

ФИЗИКА КОСМОСА

*Труды 49-й Международной
студенческой научной конференции
27 января – 31 января 2020 г.*



Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

Ф И З И К А К О С М О С А

Труды 49-й Международной
студенческой научной конференции

Екатеринбург, Россия

27—31 января 2020 г.

Екатеринбург
Издательство Уральского университета
2020

УДК 52(063)
Ф503

Издается по решению
организационного
комитета конференции

Редколлегия:

Э. Д. Кузнецов (ответственный редактор), Д. З. Вибе (Институт астрономии РАН), А. Б. Островский, С. В. Салий, А. М. Соболев (Уральский федеральный университет), К. В. Холшевников (Санкт-Петербургский государственный университет), Б. М. Шустов (Институт астрономии РАН)

Физика космоса : тр. 49-й Международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, Россия, 27—31 янв. 2020 г. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2020. — 265 с. — ISBN 978-5-7996-2935-9. — Текст электронный.

ISBN 978-5-7996-2935-9

DOI 10.15826/B978-5-7996-2935-9.00

В сборнике представлены доклады и сообщения студенческой научной конференции, которая ежегодно проводится в Астрономической обсерватории Уральского федерального университета. Цель конференции — обобщить достижения в области астрономии и астрофизики и способствовать формированию навыков и способностей молодых исследователей.

Сборник предназначен для профессиональных астрономов и физиков, студентов и аспирантов соответствующих специальностей.

УДК 52(063)

ISBN 978-5-7996-2935-9

© Уральский федеральный
университет, 2020

ФИЗИКА КОСМОСА
49-я МЕЖДУНАРОДНАЯ СТУДЕНЧЕСКАЯ
НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

Организаторы

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Международная общественная организация
«АСТРОНОМИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО»**

УРАЛЬСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
**Кафедра астрономии, геодезии, экологии
и мониторинга окружающей среды**
Астрономическая обсерватория

Екатеринбург, Россия

27—31 января 2020 г.

Организационный комитет

Э. Д. Кузнецов (председатель, Уральский федеральный университет), А. М. Соболев (заместитель председателя, Уральский федеральный университет), Д. З. Вибе (Институт астрономии РАН), А. Б. Островский (Уральский федеральный университет), С. В. Саллий (Уральский федеральный университет)

Программный комитет

А. М. Соболев (председатель, Уральский федеральный университет), А. Б. Островский (заместитель председателя, Уральский федеральный университет), Д. З. Вибе (Институт астрономии РАН), И. И. Зинченко (Институт прикладной физики РАН), Э. Д. Кузнецов (Уральский федеральный университет), О. К. Сильченко (Государственный астрономический институт им. Штернберга, МГУ), К. В. Холшевников (Санкт-Петербургский государственный университет), Б. М. Шустов (Институт астрономии РАН)

Жюри конкурса студенческих научных работ

Д. З. Вибе (председатель, Институт астрономии РАН), Т. Ю. Галушина (Томский государственный университет), А. Б. Островский (Уральский федеральный университет), В. Ш. Шайдулин (Санкт-Петербургский государственный университет) О. С. Угольников (Институт космических исследований РАН)

Финансовая поддержка

Отдел по делам молодежи администрации Октябрьского района г. Екатеринбурга

Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

Обзорные лекции



Septem artes liberales.
Гравюра. XV в.

ОРБИТАЛЬНЫЕ И ВЕКОВЫЕ РЕЗОНАНСЫ В ДВИЖЕНИИ АСТЕРОИДОВ, СБЛИЖАЮЩИХСЯ С ЗЕМЛЕЙ

Т. Ю. Галушина

Томский государственный университет

Данная работа посвящена орбитальным и вековым резонансам в динамике астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ). Рассмотрены основные резонансные характеристики орбитальных и апсидально-нодальных резонансов, представлена методика их выявления. На примере движения некоторых астероидов показано взаимное влияние резонансов и тесных сближений. Приведен краткий обзор последних исследований динамики АСЗ в окрестности орбитальных и вековых резонансов.

MEAN MOTION AND SECULAR RESONANCES IN THE MOTION OF NEAR-EARTH ASTEROIDS

T. Yu. Galushina

Tomsk State University

The paper deals with mean motion and secular resonances in the near-Earth asteroids' (NEA) dynamics. It is considered main resonance characteristics of mean motion and apsidal-nodal resonances, technique of them determination is presented. We showed the mutual influence of resonances and close approaches on some asteroid motion examples. It is presented a brief review of recent studies of NEA dynamics near mean-motion and secular resonances.

Введение

Движение астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ), важно изучать по ряду причин: с практической точки зрения — для решения проблемы астероидной опасности [1, 2], с теоретической — для понимания эволюции Солнечной системы [3]. Динамика АСЗ испытывает существенное влияние таких явлений, как орбитальные и вековые резонансы. При этом в зависимости от различных условий

резонансы могут как стабилизировать орбиту, тем самым предотвращая сближения и столкновения с планетами [4], так и, наоборот, приводить к существенному ее изменению. Прохождения вблизи возмущающих тел, в свою очередь, могут способствовать входу или выходу из резонансов. Рассмотрим эти важные особенности движения более подробно.

Орбитальный резонанс

Орбитальный резонанс представляет собой соизмеримость периодов астероида и большой планеты. Иными словами, можно сказать, что астероид и планета движутся в орбитальном резонансе, если отношения их периодов (или средних движений) близко к отношению целых чисел.

Яркую демонстрацию орбитального резонанса, в частности, представляют астероиды, чьи орбитальные периоды примерно в два раза меньше периода Юпитера. Одним из таких объектов является 437994 2003 UL12 (рис. 1). Перигелий орбиты астероида лежит в окрестности орбиты Земли, а в афелии он пересекает орбиту Юпитера (в проекции на плоскость эклиптики). Очевидно, что единственный способ выжить на такой орбите — избегать сближений с гигантом благодаря резонансу. На рис. 1, а показано положение Юпитера и астероида в момент прохождения им афелия. Резонансный характер движения наиболее наглядно показывает система координат, вращающаяся с угловой скоростью Юпитера. На рис. 1, б представлена орбита астероида на интервале времени примерно 1 000 лет. Юпитер неподвижен, и ясно видно, как рассматриваемый объект избегает встречи с планетой. Здесь и далее во вращающейся системе координат тонкими линиями показаны средние расстояния до планет. Все начальные данные взяты из каталога Э. Боуэлла на июнь 2019 г. [5], вычисления выполнены с помощью программного комплекса ИДА [6, 7]. Использована модифицированная версия, которая позволяет автоматизировать процесс построения графиков и использовать нейронные сети для классификации резонансов.

Перейдем от качественного описания резонанса к количественному. В качестве основных резонансных характеристик традиционно рассматриваются резонансная щель и критический аргумент.

Если существует соизмеримость средних движений астероида и планеты, то конфигурация данной системы характеризуется периодичностью. В этом случае взаимные возмущения, обусловленные

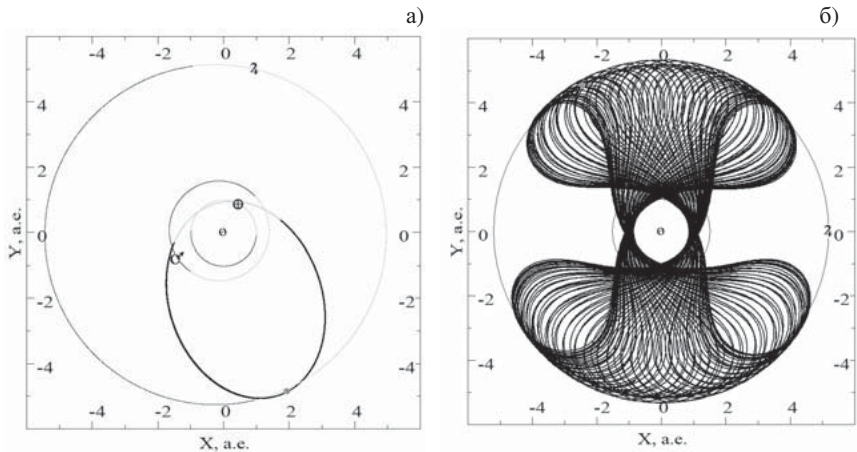


Рис. 1. Астероид 437994 2003 UL12: проекция орбиты астероида и больших планет в неподвижной (а) и вращающейся с угловой скоростью Юпитера (б) системах координат

конфигурацией системы, будут иметь один и тот же период, что усиливает возмущения [8]. Усиление возмущений происходит в момент соединения астероида и планеты, поэтому основным является выражение для долготы соединения, следовательно, критический (резонансный) аргумент будет иметь вид $\beta = k_0\lambda_0 - k_j\lambda_j - (k_0 - k_j)\omega_0 - (k_0 - k_j)\Omega_0$, где λ_0, λ_j — средние долготы астероида и j -й планеты; ω_0 — аргумент перигея астероида; Ω_0 — долгота восходящего узла астероида.

В качестве еще одной резонансной характеристики используется производная критического аргумента — так называемая резонансная щель. Поскольку аргумент перигея и долгота восходящего узла меняются существенно медленнее средней долготы орбиты астероида, то для упрощения их производными можно пренебречь. Согласно работе [9] будем считать, что астероид движется в α -резонансе k_j/k_0 с j -й планетой, если $\alpha = k_0n_0 - k_jn_j$ есть малая величина. Здесь n_0, n_j — средние движения соответственно астероида и j -й планеты, k_0, k_j — целые числа. Величину α будем называть резонансной полосой или «щелью», а под порядком резонанса будем понимать число $k = k_0 + k_j$.

В общем случае удобно первоначальный отбор резонансных объектов осуществлять на основе значений резонансной щели, а потом исследовать поведение критического аргумента для выбранных астероидов. Если аргумент испытывает колебания на всем интервале исследований, то можно говорить о наличии резонанса. В случае циркуляции резонанс отсутствует. Однако возможны и промежуточные варианты, когда циркуляция сменяет либрацию или наоборот. Такое поведение свидетельствует о неустойчивом резонансе.

В случаях когда классификация по критическому аргументу и резонансной щели оказывается неоднозначной, удобно привлекать третью характеристику — так называемый фазовый портрет, а именно орбитальную эволюцию в координатах $e \cos \beta$ и $e \sin \beta$ [3]. Если полученная кривая охватывает начало координат, то мы имеем дело с циркуляцией, в противном случае — с либрацией.

В качестве еще одного примера резонансного движения рассмотрим астероид 2012 US68 (рис. 2). В перигелии он заходит внутрь орбиты Меркурия ($q = 0.11$ а. е.), а в афелии приближается к орбите Юпитера ($Q = 4.90$ а. е.). Резонанс 3/1 с Юпитером защищает астероид от сближений с планетой. На рис. 3 показаны эволюция резонансной щели (а) и критического аргумента (б), фазовый портрет (в), а также сближения с Меркурием (г), Венерой (д), Землей (е) и Марсом (ж) на интервале времени (–2000 г., 6000 г.). На всем интервале исследования астероид движется в устойчивом орбитальном резонансе, но в будущем тесные сближения с планетами земной группы приводят к увеличению амплитуды либрации резонансных характеристик. Кроме того, 2012 US68 движется в окрестности резонанса 1/4 с Землей, но не переходит через значение точной соизмеримости, критический аргумент циркулирует; такое резонансное соотношение не может служить защитным механизмом от сближений.

При исследовании движения небесных тел необходимо принимать во внимание такой важный вопрос, как выбор модели сил [10]. Для объектов, подходящих близко к Солнцу, имеет смысл оценить влияние эффекта Ярковского. Согласно нашим исследованиям трансверсальное ускорение, обусловленное действием рассматриваемого эффекта, для 2012 US68 составляет $A_2 = 4.6 \cdot 10^{-13}$ а. е./сут. По алгоритму, приведенному в [11], данное значение соответствует изменению большой полуоси $da/dt = -3.8 \cdot 10^{-3}$ а. е./млн лет. На интервале порядка тысячи лет смещение составит $da/dt = -3.8 \cdot 10^{-6}$ а. е., что находится на пределе точности определения параметров орбиты и

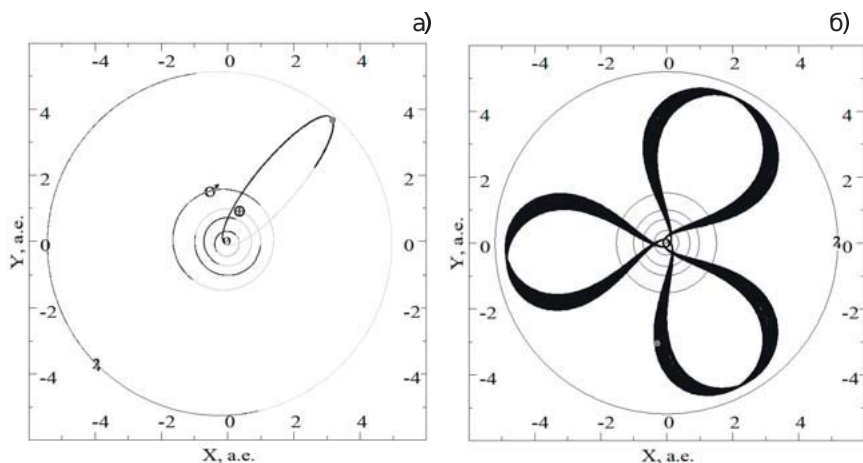


Рис. 2. Астероид 2012 US68: проекция орбиты астероида и больших планет в неподвижной (а) и вращающейся с угловой скоростью Юпитера (б) системах координат

не может существенно повлиять на резонансное поведение астероида. Однако при исследовании долговременной эволюции эффектом Ярковского пренебрегать нельзя.

На рис. 3 примечательно отсутствие сближений в прошлом. Учитывая большой наклон орбиты астероида к эклиптике (25.8°), сближения могут иметь место только в окрестности узлов. На рис. 4 показано расстояние от Солнца до нисходящего (черный цвет) и восходящего (серый цвет) узла орбиты. Нисходящий узел большую часть интервала исследования находится внутри орбиты Меркурия и только около 4 000 года начинает расти и в результате достигает отметки 2.9 а. е., что делает возможным сближения. Иное поведение демонстрирует восходящий узел: сначала он находится около орбиты Юпитера (однако орбитальный резонанс позволяет избежать сближений), затем постепенно перемещается во внутреннюю часть Солнечной системы, что приводит к сближениям с планетами земной группы. Положение узлов орбиты связано с изменениями долготы восходящего узла и аргумента перигелия, что естественным образом заставляет нас обратить внимание на вековые, в частности апсидально-нодальные, резонансы.

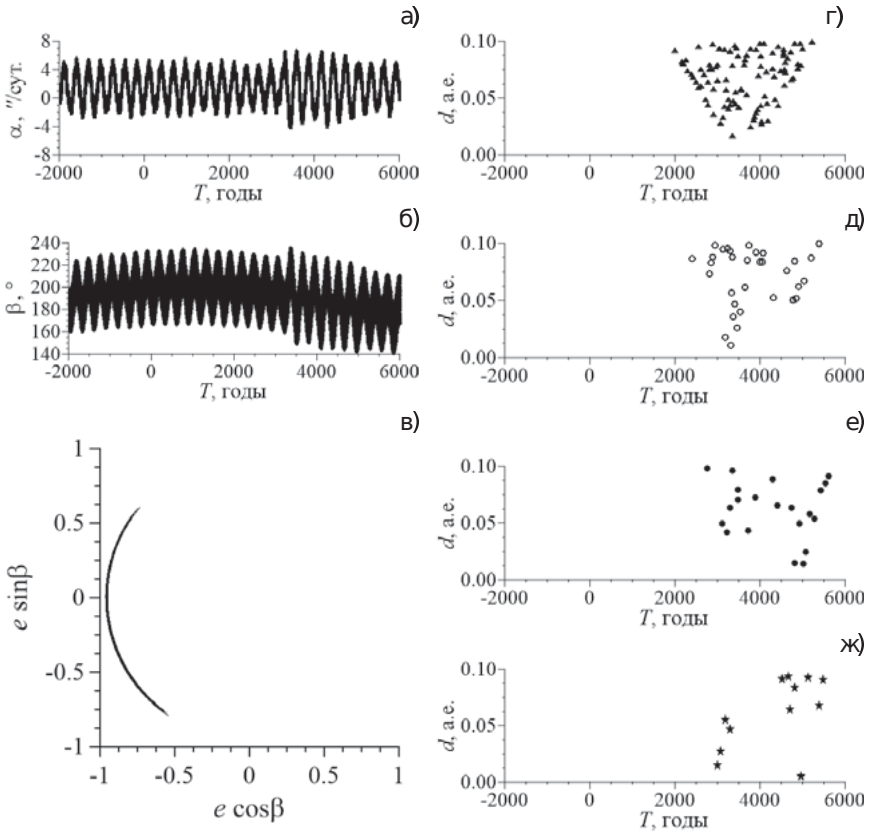


Рис. 3. Астероид 2012 US68: эволюция резонансной щели (а) и критического аргумента (б), фазовый портрет (в), сближения с Меркурием (г), Венерой (д), Землей (е) и Марсом (е)

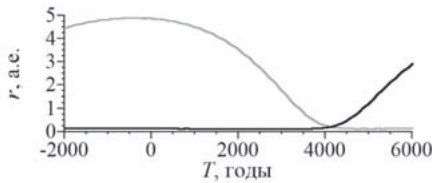


Рис. 4. Астероид 2012 US68: расстояние от Солнца до нисходящего (черный цвет) и восходящего (серый цвет) узла орбиты

Вековые резонансы

В то время как орбитальные резонансы способствуют сохранению взаимного расположения тел на орбитах, вековые отвечают за положения орбит в пространстве, поскольку обусловлены соизмеримостями между скоростями прецессий орбит астероида и планеты и зависят от аргумента перицентра и долготы восходящего узла. Эти переменные являются медленно меняющимися, поэтому период вековых резонансов существенно больше.

Методика выявления вековых резонансов подробно описана в работах [12, 13]. Рассмотрим здесь основные понятия. Аргумент возмущающей функции однократно и двукратно осредненной ограниченной задачи трех тел имеет следующий вид:

$$\underline{\underline{\psi}} = (l - 2p' + q')M' + (l - 2p)\omega + (l - 2p')\omega' + j(\Omega - \Omega'), \quad (1)$$

$$\underline{\underline{\psi}} = (l - 2p)\omega + (l - 2p')\omega' + j(\Omega - \Omega'), \quad (2)$$

где $\omega = \omega_0 + \dot{\omega}(t - t_0)$, $\Omega = \Omega_0 + \dot{\Omega}(t - t_0)$ — аргумент перицентра и долгота восходящего узла астероида; $M' = M'_0 + n'(t - t_0)$, $\omega' = \omega'_0 + \dot{\omega}'(t - t_0)$, $\Omega' = \Omega'_0 + \dot{\Omega}'(t - t_0)$ — средняя аномалия, аргумент перицентра и долгота восходящего узла планеты; p, p', q, q', l, j — целые числа. Тогда условие резонанса запишется следующим образом:

$$\underline{\underline{\dot{\psi}}} \cong 0. \quad (3)$$

Перебирая различные значения целых чисел, получим следующий спектр резонансных соотношений до 6-го порядка (табл. 1). Отдельную задачу представляет собой вычисление производных по времени от аргумента перицентра и долготы восходящего узла. Возможны как минимум два пути ее решения: по производным от полиномов Лагранжа [14] и с использованием уравнений Ньютона—Эйлера [15].

Соотношения 1—16 описывают смешанный вековой резонанс (апсидально-нодальный), соотношение 17 — чисто нодальный, а 18, 19 — апсидальные резонансы. Соотношение 20 представляет собой геометрический резонанс типа Лидова—Козаи. Этот резонанс интересен тем, что зависит только от взаимного расположения объектов и не связан с частотами движения возмущающих тел. По аналогии с орбитальными резонансами можно говорить о наличии резонанса при выполнении двух условий — малости резонансного соотношения

Таблица 1. Типы апсидально-нодальных резонансных соотношений

№	Тип резонансного соотношения	№	Тип резонансного соотношения
1	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_i) + \dot{\omega} - \dot{\omega}'_i$	11	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_i) + \dot{\omega}$
2	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_i) - \dot{\omega} + \dot{\omega}'_i$	12	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_i) - \dot{\omega}$
3	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_i) + 2\dot{\omega} - 2\dot{\omega}'_i$	13	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_i) + \dot{\omega}'_i$
4	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_i) - 2\dot{\omega} + 2\dot{\omega}'_i$	14	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_i) - \dot{\omega}'_i$
5	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_i) + \dot{\omega} + \dot{\omega}'_i$	15	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_i) - 2\dot{\omega}'_i$
6	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_i) - \dot{\omega} - \dot{\omega}'_i$	16	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_i) + 2\dot{\omega}'_i$
7	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_i) + 2\dot{\omega} + 2\dot{\omega}'_i$	17	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_i)$
8	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_i) - 2\dot{\omega} - 2\dot{\omega}'_i$	18	$\dot{\omega} - \dot{\omega}'_i$
9	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_i) + 2\dot{\omega}$	19	$\dot{\omega} + \dot{\omega}'_i$
10	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_i) - 2\dot{\omega}$	20	$\dot{\omega}$

и либрации резонансного аргумента. В трудных для классификации случаях также возможно использование фазовых портретов. Следует отметить, что при изучении большого числа объектов применение методов автоматического построения графиков и классификации на основе искусственного интеллекта существенно облегчает полный анализ всего спектра орбитальных и вековых резонансов.

Более подробно рассмотрим апсидально-нодальные резонансы на примере астероида 2012 US68. В табл. 2 представлены границы изменения резонансных соотношений с Юпитером. Видно, что все резонансные соотношения близки к нулю. Отметим, что соотношения для остальных планет отличаются незначительно от представленных.

В качестве примера на рис. 4 показаны эволюция резонансных соотношений (а, г) и аргументов (б, д), а также фазовые портреты (в, е) для резонанса № 16 с Землей и резонанса Лидова—Козаи. Резкие кратковременные изменения резонансного соотношения соответствуют тесным сближениям. Что касается резонансных аргументов, то можно заметить, что их изменения на рассматриваемом интервале времени значительно меньше 360° , но данное поведение нельзя

Таблица 2. Границы изменения резонансных соотношений

№	$\dot{\psi}, '' / \text{сут.}$	№	$\dot{\psi}, '' / \text{сут.}$
1, 5, 11	(-1.5, 1.0)	4, 8, 10	(-28.2, 4.3)
2, 6, 12	(-19.3, 2.9)	13–17	(-10.4, 1.5)
3, 7, 9	(-2.3, 7.4)	18–20	(-1.4, 8.9)

в полной мере считать либрацией, потому что они занимают менее одного периода. Тем не менее внешний вид фазового портрета подтверждает наличие резонанса. Похожее поведение демонстрируют и остальные резонансные характеристики.

Заключение

Орбитальные и вековые резонансы оказывают значительное влияние на движение астероидов, сближающихся с Землей. Устойчивый орбитальный резонанс способствует сохранению геометрической конфигурации «астероид—планета», а вековые резонансы определяют положение орбиты в пространстве. Резонансы являются весьма распространенным явлением среди АСЗ. В качестве примера: среди 40 астероидов с малым перигелийным расстоянием почти половина вовлечены в орбитальный резонанс с планетами, и для каждого объекта наблюдаются хотя бы некоторые из апсидально-нодальных соотношений.

Орбитальным резонансам среди АСЗ посвящено большое число работ. Не имея возможности в рамках данной публикации сделать подробный обзор, упомянем некоторые статьи этого года. В [16] рассмотрена пара астероидов, предположительно имеющих общее происхождение и движущихся в резонансе 3/5 с Венерой. Работа [17] посвящена изучению астероидов в резонансе с Землей, орбиты которых близки к плоскости эклиптики. Эти объекты справедливо привлекают внимание ученых, поскольку могут сближаться с нашей планетой не только в окрестности узлов. Авторы статьи [18] изучают потенциально опасные астероиды и отмечают, что резонансные объекты представляют меньшую угрозу для Земли.

Иная ситуация с изучением вековых резонансов. Несмотря на то что аналитическая теория вековых резонансов была применена к главному поясу еще в 1969 г. [19], подобные исследования для АСЗ

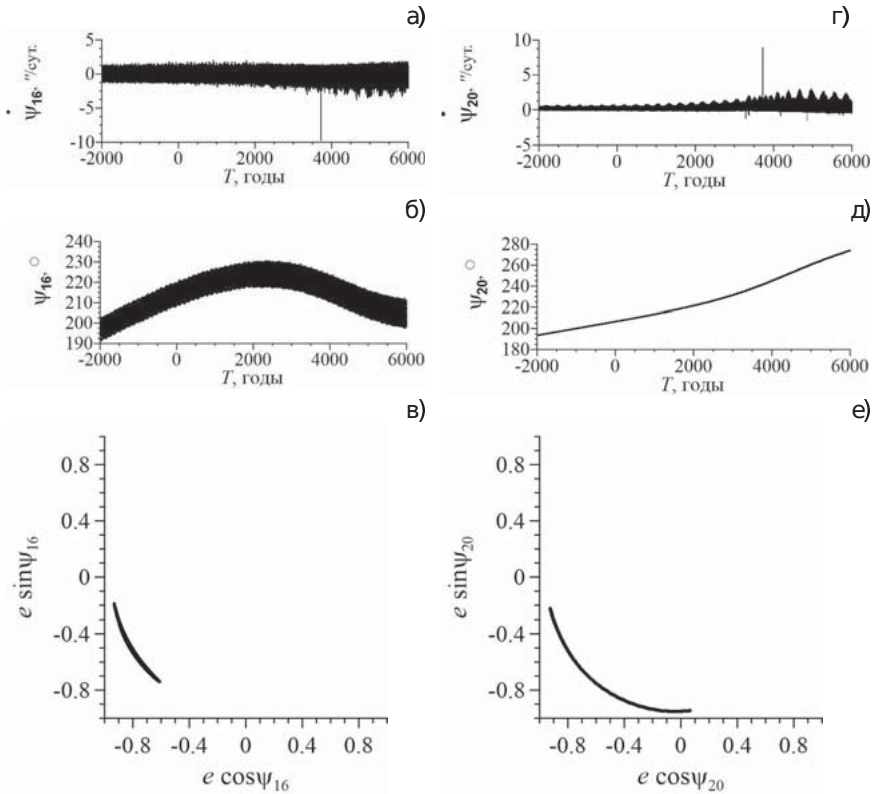


Рис. 5. Астероид 2012 US68: эволюция резонансных соотношений (а, г) и критических аргументов (б, д); фазовые портреты (в, е) для резонансов № 16 и 20 с Землей

начали появляться только в последние годы, их число пока очень мало. По-видимому, это связано с тем, что изучать движение АСЗ аналитическими методами невозможно, а при численном интегрировании тесные сближения приводят к снижению точности, что делает весьма непростым проведение исследований на длительных интервалах времени.

Авторы работы [20] рассматривают семейство Флоры в вековом резонансе ν_6 , которое может быть источником АСЗ. В статье [21] изучается долгопериодическая эволюция астероида 2013 RB6, движущегося в вековом резонансе ν_5 , но вдали от орбитальных резонан-

сов. Отметим, что резонанс ν_6 соответствует резонансу с Сатурном № 18 в нашей терминологии, а ν_5 — тому же резонансу с Юпитером. В нашей работе [14] исследована короткопериодическая эволюция астероидов, проходящих через сферу тяготения Земли; показано, что все рассматриваемые объекты находятся в вековых резонансах.

Отдельно следует отметить некоторые сложности исследования резонансного движения, связанные с обилием графического материала, которые требуется анализировать как визуально, так и численно. Особенно явно эта проблема проявляется при необходимости исследовать движение большого числа объектов или тестовых частиц. На помощь здесь приходят как автоматизация построения графиков, так и машинный анализ данных [22].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-72-10022).

Библиографические ссылки

1. Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра /ред. Б. М. Шустов, Л. В. Рыхлова. — М. : ФИЗМАТЛИТ, 2010. — С. 348.
2. Емельяненко В. В., Попова О. П., Чугай Н. Н. и др. Астрономические и физические аспекты Челябинского события 15 февраля 2013 г. // Астрон. вестн. — 2013. — Т. 47, вып. 4. — С. 262—277.
3. Мюррей К., Дермотт С. Динамика Солнечной системы. — М. : ФИЗМАТЛИТ, 2009. — С. 588.
4. Галушина Т. Ю. Динамика резонансных астероидов // Физика космоса : тр. 45-й Международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 1—5 февр. 2016 г. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2016. — С. 43—58.
5. *Bowell E., Muinonen K., Wasserman L. H.* A public-domain asteroid data base // In *Asteroids, Comets, Meteors*, Kluwer, Dordrecht, Netherlands. — 1994. — P. 477—481.
6. Быкова Л. Е., Галушина Т. Ю. Прикладной программный комплекс «ИДА» для исследования динамики астероидов // Изв. вузов. Физика. — 2012. — Т. 55, вып. 10/2. — С. 89—96.
7. *Galushina T., Bykova L., Letner O., Baturin A.* IDA software for investigating asteroid dynamics and its application to studying the motion of 2012 MF7 // *Astronomy and Computing*. — 2019. — Vol. 26.
8. Гринберг Р. Орбитальный резонанс в движении естественных спутников // Спутники планет / ред. Дж. Бернс. — М., 1980. — С. 189—202.
9. Гребеников Е. А., Рябов Ю. А. Резонансы и малые знаменатели в небесной механике. — М. : Наука, 1978. — С. 128.

10. *Galushina T. Yu., Ryabova G. O., Skripnichenko P. V.* The force model for asteroid (3200) Phaethon // Planetary and Space Science. — 2015. — Vol. 118. — P. 296–301.
11. *Farnocchia D., Chesley S. R., Vokrouhlický D. V. et al.* Near Earth Asteroids with measurable Yarkovsky effect // Icarus. — 2013. — Vol. 224. — P. 1–3.
12. *Бордовицына Т. В., Томилова И. В., Чувашов И. Н.* Влияние вековых резонансов на долговременную орбитальную эволюцию неуправляемых объектов спутниковых радионавигационных систем в области МЕО // Астрон. вестн. — 2012. — Т. 46, вып. 5. — С. 356–368.
13. *Galushina T. Yu., Sambarov G. E.* The dynamical evolution and the force model for asteroid (196256) 2003 EH1 // Planetary and Space Science. — 2017. — Vol. 142. — P. 38–47.
14. *Летнер О. Н., Галушина Т. Ю.* Поиск вековых резонансов в динамике нумерованных астероидов, проходящих через сферу тяготения Земли в ближайшие 200 лет // Астрон. вестн. — 2019. — Т. 53, вып. 1. — С. 24–33.
15. *Попандопуло Н. А., Александрова А. Г., Бордовицына Т. В.* Численные модели движения искусственных спутников Земли и Луны и возможности их использования : тез. докл. XI Международ. науч. конф. «Околоземная астрономия и космическое наследие», Казань, 30 сент. — 4 окт. 2019 г. — 2019. — С. 86–87.
16. *Fuente Marcos de la C., Fuente Marcos de la R.* Dancing with Venus in the shadow of the Earth: a pair of genetically related near-Earth asteroids trapped in a mean-motion resonance // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters. — 2019. — Vol. 483, iss. 1. — P. L37–L41.
17. *Qi Y., Ruiter de A.* Planar near-Earth asteroids in resonance with the Earth // Icarus. — 2019. — Vol. 333. — P. 52–60.
18. *Li M., Huang Y., Gong S.* Assessing the risk of potentially hazardous asteroids through mean motion resonances analyses // Astrophysics and Space Science. — 2019. — Vol. 364, iss. 5. — P. 12.
19. *Williams J. G.* Secular perturbations in the Solar System. Ph. D. Dissertation. — Los Angeles : University of California, 1969.
20. *Vokrouhlický D., Bottke W. F., Nesvorný D.* Forming the Flora Family: Implications for the Near-Earth Asteroid Population and Large Terrestrial Planet Impactors // Astrophysics and Space Science. — 2017. — Vol. 153, iss. 4. — P. 23.
21. *Емельяненко В. В., Емельяненко Н. Ю.* Долгоживущий околоземный астероид 2013 RB6 // Астрон. вестн. — 2018. — Т. 52, вып. 1. — С. 70–72.

22. Красавин Д. С., Александрова А. Г., Томилова И. В. Применение искусственных нейронных сетей в задачах анализа динамической структуры околоземного орбитального пространства : тез. докл. XI Международ. науч. конф. «Околоземная астрономия и космическое наследие», Казань, 30 сент. — 4 окт. 2019 г. — 2019. — С. 62–63.

ОБРАЗОВАНИЕ МАССИВНЫХ ЗВЕЗД

И. И. Зинченко

*Институт прикладной физики РАН, Нижегородский
государственный университет им. Н. И. Лобачевского*

Обсуждаются результаты наблюдательных и теоретических исследований процесса образования массивных звезд. В частности, приводятся данные о наблюдавшихся недавно вспышках светимости таких объектов, которые свидетельствуют об эпизодах дисковой аккреции. Рассматриваются вопросы индуцированного звездообразования.

HIGH MASS STAR FORMATION

I. I. Zinchenko

*Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences,
Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod*

The results of observational and theoretical studies of the formation of massive stars are discussed. In particular, data are provided on recently observed bursts of luminosity of such objects, which indicate episodes of disk accretion. The issues of induced star formation are considered.

Введение

Массивными считаются звезды с массой $\gtrsim 8$ масс Солнца [1]. Эти звезды играют очень большую роль в эволюции межзвездной среды и галактик в целом. Время жизни их сравнительно невелико. Многие из них заканчивают свою эволюцию вспышкой сверхновой. Такие вспышки сильно влияют на состояние и динамику межзвездного газа, а также обогащают межзвездную среду тяжелыми элементами. В то же время пока нет достаточного понимания того, как такие звезды образуются. Теоретические проблемы связаны, в частности, с тем, что эти звезды начинают оказывать сильное влияние на окружающее вещество еще в процессе набора массы, поскольку ядерные

реакции в них начинаются довольно рано. Наблюдения же затрудняются тем обстоятельством, что таких звезд мало и они находятся далеко от нас.

Наблюдения

Области образования массивных звезд имеют сложную пространственно-кинематическую структуру и содержат разнообразные компоненты: молекулярный газ, нейтральный атомарный газ, ионизованный газ, пыль, а также звезды и протозвезды на разных стадиях эволюции. Исследования этих компонент требуют проведения наблюдений в различных диапазонах длин волн — от сравнительно низкочастотного радиодиапазона, где излучает ионизованный газ, до оптического и ультрафиолетового диапазонов, в которых изучается излучение звезд. Для этих наблюдений требуется набор инструментов, работающих в указанных диапазонах. Наиболее информативными из них являются миллиметровый и субмиллиметровый диапазоны длин волн, в которые попадают основные важные для диагностики протозвездных облаков линии атомов и молекул. На субмиллиметровых волнах также лежит пик излучения пыли, температура которой в таких облаках составляет $\sim 10\text{--}30$ К. Возможности наблюдений на этих волнах значительно возросли с вводом в строй антенной решетки ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) в Чили. Очень много важной информации было получено благодаря космическим аппаратам *Spitzer* [2, 3], *Herschel* [4], Wide Field Infrared Survey Explorer — WISE [5] и др. Ожидаемый в конце 20-х гг. запуск космической обсерватории «Миллиметрон» [6, 7] позволит получить новую ценную информацию об этих объектах.

В коротком обзоре невозможно описать полученные к настоящему времени результаты. Большая часть из них суммирована в нескольких обзорах (например, [1, 8–11]). В качестве примера многоволнового исследования области образования массивных звезд можно привести наши работы по изучению комплекса S254–S258 [12–19]. Одним из самых интересных результатов последнего времени явилось обнаружение вспышки светимости в различных диапазонах длин волн у находящегося в этом комплексе массивного протозвездного объекта с массой около $20 M_{\odot}$ S255 NIRS3 [20–23]. Подобное явление было зарегистрировано и в другом массивном протозвездном объекте — NGC6334I-MM1 [24].

Вероятные сценарии образования массивных звезд

Механизм образования массивных звезд до сих пор неясен и активно обсуждается (например, [1, 10]). Основные обсуждаемые модели — это монолитный коллапс массивного плотного ядра и так называемая конкурентная аккреция. Предлагаются также довольно экзотические модели, в которых массивные звезды образуются путем слияния звезд меньшей массы [25].

Имеется много наблюдений так называемых дозвездных ядер небольшой массы, в которых образуются звезды с массой порядка солнечной. Ряд работ был нацелен на поиск массивных дозвездных ядер (с массой $\sim 30 M_{\odot}$ в радиусе 0.03 пк), которые могли бы сформировать массивную протозвезду. Обнаружение таких ядер явилось бы аргументом в поддержку модели монолитного коллапса при образовании массивных звезд. Однако к настоящему времени удалось обнаружить всего лишь несколько кандидатов в такие ядра [26], при этом неясно, действительно ли они таковыми являются.

Как отмечено выше, недавно были зарегистрированы два события, которые свидетельствуют в пользу дисковой аккреции как механизма образования звезд с массой по крайней мере до $\sim 20 M_{\odot}$. Это вспышки светимости в объектах S255 NIRS3 [20–23] и NGC6334I-MM1 [24]. Подобные вспышки хорошо известны у звезд небольшой массы, но у массивных протозвезд наблюдались впервые. Эти явления хорошо соответствуют модели эпизодической дисковой аккреции [27], в которой массивный протозвездный диск фрагментирует и образовавшиеся фрагменты время от времени падают на протозвезду, вызывая вспышки светимости.

Процесс образования звезд, в том числе массивных, может запускаться какими-то внешними воздействиями. Такие триггерные механизмы рассматриваются с давних пор [28]. Как правило, они связаны с действием ударных волн, которые сжимают межзвездный газ, создавая условия для развития гравитационной неустойчивости. Широко обсуждаемым вариантом является такой процесс в оболочках расширяющихся областей ионизованного водорода (например, [29]). Возможным сценарием являются столкновения облаков (например, [30]). Имеются наблюдения в поддержку такой модели (например, [31, 32]).

Закключение

Процесс образования массивных звезд весьма сложен для теоретического описания, поскольку необходим учет воздействия формирующейся звезды на окружающее вещество. Наблюдательные исследования затрудняются в связи с редкостью и удаленностью областей образования массивных звезд. Тем не менее новое поколение астрономических инструментов позволяет уже довольно детально изучать этот процесс. Последние результаты указывают, в частности, на важную роль эпизодической дисковой аккреции в образовании массивных звезд.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-02-00660.

Библиографические ссылки

1. *McKee C. F., Ostriker E. C.* Theory of Star Formation // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 2007. — Vol. 45. — P. 565–687. 0707.3514.
2. *Benjamin R. A., Churchwell E., Babler B. L. et al.* GLIMPSE. I. An SIRTf Legacy Project to Map the Inner Galaxy // *Publ. Astron. Soc. Pac.* — 2003. — Vol. 115. — P. 953–964. astro-ph/0306274.
3. *Carey S. J., Noriega-Crespo A., Price S. D. et al.* MIPS GAL: A Survey of the Inner Galactic Plane at 24 and 70 microns, Survey Strategy and Early Results // *American Astronomical Society Meeting Abstracts : Bulletin of the American Astronomical Society.* — 2005. — Vol. 37. — P. 1252.
4. *Pilbratt G. L., Riedinger J. R., Passvogel T. et al.* Herschel Space Observatory. An ESA facility for far-infrared and submillimetre astronomy // *Astron. Astrophys.* — 2010. — Vol. 518. — P. L1. 1005.5331.
5. *Wright E. L., Eisenhardt P. R. M., Mainzer A. K. et al.* The Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE): Mission Description and Initial On-orbit Performance // *Astron. J.* — 2010. — Vol. 140. — P. 1868–1881. 1008.0031.
6. *Smirnov A. V., Baryshev A. M., Pilipenko S. V. et al.* Space mission Millimetron for terahertz astronomy // *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series : Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series.* — 2012. — Vol. 8442.
7. *Kardashev N. S., Novikov I. D., Lukash V. N. et al.* Review of scientific topics for the Millimetron space observatory // *Physics Uspekhi.* — 2014. — Vol. 57, № 12. — P. 1199–1228. 1502.06071.
8. *Zinnecker H., Yorke H. W.* Toward Understanding Massive Star Formation // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 2007. — Vol. 45, № 1. — P. 481–563. 0707.1279.

9. *Krumholz M. R., Klein R. I., McKee C. F. et al.* The Formation of Massive Star Systems by Accretion // Science. — 2009. — Vol. 323, № 5915. — P. 754. 0901.3157.
10. *Tan J. C., Beltrán M. T., Caselli P. et al.* Massive Star Formation // Protostars and Planets VI. — 2014. — P. 149–172. 1402.0919.
11. *Motte F., Bontemps S., Louvet F.* High-Mass Star and Massive Cluster Formation in the Milky Way // Ann. Rev. Astron. Astrophys. — 2018. — Vol. 56. — P. 41–82. 1706.00118.
12. *Ojha D. K., Samal M. R., Pandey A. K. et al.* Star Formation Activity in the Galactic H II Complex S255-S257 // Astrophys. J. — 2011. — Vol. 738. — P. 156. 1106.1858.
13. *Zinchenko I., Liu S.-Y., Su Y.-N. et al.* A Multi-wavelength High-resolution study of the S255 Star-forming Region: General Structure and Kinematics // Astrophys. J. — 2012. — Vol. 755. — P. 177. 1206.5906.
14. *Samal M. R., Ojha D. K., Jose J. et al.* Star formation in the filament of S254-S258 OB complex: a cluster in the process of being created // Astron. Astrophys. — 2015. — Vol. 581. — P. A5.
15. *Zinchenko I., Liu S.-Y., Su Y.-N. et al.* The Disk-outflow System in the S255IR Area of High-mass Star Formation // Astrophys. J. — 2015. — Vol. 810. — P. 10. 1507.05642.
16. *Zinchenko I., Liu S.-Y., Su Y.-N., Sobolev A. M.* Detection of a new methanol maser line with ALMA // Astron. Astrophys. — 2017. — Vol. 606. — P. L6. 1709.08889.
17. *Zemlyanukha P. M., Zinchenko I. I., Salii S. V. et al.* The Spatial-Kinematic Structure of the Region of Massive Star Formation S255N on Various Scales // Astronomy Reports. — 2018. — Vol. 62, № 5. — P. 326–345. 1805.02465.
18. *Zinchenko I., Liu S., Su Y., Wang Y.* Disks and outflows in the S255IR area of high mass star formation from ALMA observations // Research in Astronomy and Astrophysics. — 2018. — Vol. 18. — P. 093.
19. *Ryabukhina O. L., Zinchenko I. I., Samal M. R. et al.* Study of the filamentary infrared dark cloud G192.76+00.10 in the S254-S258 OB complex // Research in Astronomy and Astrophysics. — 2018. — Vol. 18. — P. 095.
20. *Caratti O Garatti A., Stecklum B., Garcia Lopez R. et al.* Disk-mediated accretion burst in a high-mass young stellar object // Nature Physics. — 2017. — Vol. 13. — P. 276–279. 1704.02628.
21. *Moscadelli L., Sanna A., Goddi C. et al.* Extended CH₃OH maser flare excited by a bursting massive YSO // Astron. Astrophys. — 2017. — Vol. 600. — P. L8.

22. *Szymczak M., Olech M., Wolak P. et al.* Giant burst of methanol maser in S255IR-NIRS3 // *Astron. Astrophys.* — 2018. — Vol. 617. — P. A80. 1807.07334.
23. *Liu S., Su Y., Zinchenko I. et al.* A Submillimeter Burst of S255IR SMA1: The Rise and Fall of Its Luminosity // *Astrophys. J.* — 2018. — Vol. 863. — P. L12. 1808.02192.
24. *Hunter T. R., Brogan C. L., MacLeod G. et al.* An Extraordinary Outburst in the Massive Protostellar System NGC6334I-MM1: Quadrupling of the Millimeter Continuum // *Astrophys. J.* — 2017. — Vol. 837, № 2. — P. L29. 1701.08637.
25. *Bonnell I. A., Bate M. R., Zinnecker H.* On the formation of massive stars // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1998. — Vol. 298. — P. 93–102. [arXiv:astro-ph/9802332](#).
26. *Louvet F.* Review on high-mass star formation // SF2A-2018: Proceedings of the Annual meeting of the French Society of Astronomy and Astrophysics. — 2018. — P. Di.
27. *Meyer D. M.-A., Vorobyov E. I., Kuiper R., Kley W.* On the existence of accretion-driven bursts in massive star formation // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2017. — Vol. 464. — P. L90–L94. 1609.03402.
28. *Elmegreen B. G., Lada C. J.* Sequential formation of subgroups in OB associations. // *Astrophys. J.* — 1977. — Vol. 214. — P. 725–741.
29. *Deharveng L., Zavagno A., Caplan J.* Triggered massive-star formation on the borders of Galactic H II regions. I. A search for “collect and collapse” candidates // *Astron. Astrophys.* — 2005. — Vol. 433, № 2. — P. 565–577. [astro-ph/0412602](#).
30. *Whitworth A. P., Bhattal A. S., Chapman S. J. et al.* The Preferential Formation of High-Mass Stars in Shocked Interstellar Gas Layers // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1994. — Vol. 268. — P. 291.
31. *Dewangan L. K., Ojha D. K., Zinchenko I.* New Insights in the Mid-infrared Bubble N49 Site: A Clue of Collision of Filamentary Molecular Clouds // *Astrophys. J.* — 2017. — Vol. 851, № 2. — P. 140. 1711.06412.
32. *Dewangan L. K., Ojha D. K., Zinchenko I., Baug T.* Cloud-Cloud Collision-induced Star Formation in IRAS 18223-1243 // *Astrophys. J.* — 2018. — Vol. 861, № 1. — P. 19. 1805.07305.

ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЕ В ГАЛАКТИКАХ: КОСМОЛОГИЧЕСКИЙ КОНТЕКСТ

О. К. Сильченко

*Государственный астрономический институт Московского
государственного университета им. М. В. Ломоносова*

В лекции будет рассказано о звездообразовании в галактиках, которое во многом определяет ход их эволюции. Основная концепция звездообразования: звезды образуются из газа в плотных молекулярных облаках. Соответственно главное, от чего зависит мгновенный темп звездообразования, — количество газа. Но темп звездообразования еще зависит и от глубины ямы гравитационного потенциала, и от момента вращения, и от стимулирующего влияния спиральных волн плотности и соседних остатков сверхновых, и от аккреции газа извне. Неудивительно, что космическая история звездообразования при этом имеет далеко не простой ход.

STAR FORMATION IN GALAXIES: A COSMOLOGICAL CONTEXT

O. K. Silchenko

*Sternberg Astronomical Institute of the Lomonosov Moscow State
University*

I would talk about star formation in galaxies which is the main driver of their evolution. The principal concept is: stars are formed from gas, in dense molecular clouds. Then the main factor determining the current star formation rate is amount of gas. But observationally the star formation rate depends also on potential well depth, on angular momentum, on triggering by spiral density waves and by nearby supernova remnants, on outer gas accretion... It is so quite clear that the cosmic star formation history is rather complex.

Введение

Основная парадигма звездообразования, согласно которой звезды образуются из газовых облаков путем их сжатия и фрагментации под действием гравитационной неустойчивости, окончательно

сформировалась в XX в. Автором парадигмы был Джеймс Хопвуд Джинс, который сформулировал ее в общем виде в 1902 г., будучи еще аспирантом. Записав систему уравнений для сферического самогравитирующего облака газа, он решил ее аналитически и вывел критерий неустойчивости: чтобы сжатие и фрагментация стали необратимы, масса облака должна быть больше «джинсовской массы», зависящей только от локальной плотности газа, а газ в процессе сжатия должен высвечивать и остывать.

Поскольку основной физический принцип джинсовской концепции — формирование звезд из газа (и чем плотнее газ, тем более эффективно должен протекать процесс) — оказался очень простым, простыми и прямолинейными были и первые, классические попытки построить количественную теорию звездообразования. Эти попытки, предпринятые в 50-е гг. XX в., оказались очень успешными. Мартин Шмидт ввел закон, позднее названный «законом Шмидта», согласно которому локальные темпы звездообразования пропорциональны квадрату объемной плотности газа в этом месте [1]. Частично закон Шмидта был основан на прямых подсчетах молодых звезд в окрестностях Солнца и радионаблюдениях нейтрального водорода на длине волны 21 см, частично — на рассуждениях о том, что, поскольку газовый диск Галактики (имелся в виду именно нейтральный водород, молекулярного газа тогда еще не наблюдали) примерно в три раза толще распределения ОВ-звезд, зависимость темпов звездообразования от плотности газа не может быть линейной. «Пусть она будет квадратичной», — сказал Шмидт [2]. Впрочем, на том же симпозиуме МАС прозвучали голоса и за линейную зависимость, например, голос Эдвина Солпитера, автора первой, классической и также крайне успешной оценки начальной функции масс звезд [3]; и аргументы Солпитера тоже были общезначимые.

Интересно, что тогда не встал вопрос о пространственных масштабах применимости закона Шмидта: хотя все наблюдательные основания как закона Шмидта, так и начальной функции масс Солпитера были получены для непосредственных окрестностей Солнца, классики тут же начали применять эти законы для описания эволюции галактик в целом. В дискуссии после доклада Шмидта на вышеупомянутом симпозиуме МАС обсуждалось, можно ли описать с помощью закона Шмидта непрерывное формирование разных звездных населений Млечного Пути — сначала населения II типа (звездного гало Галактики), а потом населения I типа (диска).

Много глубоких идей и классических результатов в теорию звездообразования внес Ричард Ларсон в 60—80-е гг. XX в. [4–10]. В 80-е гг. уже было понятно, что звезды формируются в молекулярных облаках, и соответственно темпы и характеристики звездообразования должны зависеть именно от свойств (и количества) молекулярного газа. Однако, поскольку молекулярные облака считались короткоживущими из-за их концентрации к спиральным рукавам, темпы формирования молекулярных облаков опять-таки привязывались к плотности нейтрального водорода в диске галактики и закон Шмидта продолжал жить и побеждать. Однако Ларсон призывал усложнить картину и кроме прямой привязки темпов звездообразования к количеству газа учесть еще и весь комплекс динамических свойств дисков галактик: плотность распределения гравитирующего вещества (глубину потенциальной ямы) и так называемый шир (shear), связанный с дифференциальным вращением газа в диске, поскольку условия для гравитационной неустойчивости газового облака в реальности зависят не только от его массы и плотности, но и от его окружения. Джинс-то свои уравнения записывал для *изолированного* (и сферического) облака!

Что определяет темпы звездообразования

Наблюдательную основу под физику глобального звездообразования в галактиках заложил Роберт Кенникат. Начинал он как специалист по областям звездообразования в близких галактиках — огромным комплексам молодых звезд и ионизованного ими газа. Уже очень рано он предложил определять темпы звездообразования в галактиках по их интегральному излучению в эмиссионной линии $\text{H}\alpha$, поскольку интегральный поток в эмиссии коррелировал с количеством отдельных зон Стремгрена вокруг молодых звезд в галактиках, хорошо разрешаемых на такие отдельные области. Каждая зона Стремгрена содержит в себе массивную короткоживущую звезду, живую свидетельницу текущего звездообразования. Любопытно, что в своей ранней знаменитой работе [11] Кенникат указывал на крайне *слабую* корреляцию темпов звездообразования с плотностью газа (как и с массой галактики). Однако вскоре его точка зрения поменялась. В эпохальной работе 1989 г. [12] он по наблюдательным данным о распределении эмиссии $\text{H}\alpha$ в дисках 15 спиральных галактик подтверждает закон Шмидта — степенную зависимость локальных темпов звездообразования от плотности газа как для ней-

трального водорода, так и для «полной плотности газа», куда он суммировал молекулярный газ и гелий. Однако, несмотря на прямое упоминание закона Шмидта в абстракте статьи [12], показатель степени в найденной Кенникатом наблюдательной зависимости оказался не двойка, а $N = 1.3 \pm 0.3$, т. е. зависимость, вообще говоря, ближе к линейной, чем к квадратичной, на радость модельерам эволюции галактик.

Ну и, конечно, надо подчеркнуть, что поскольку Кенникат анализировал не нашу Галактику, а другие спиральные галактики, он оперировал не *объемной*, а *поверхностной* плотностью газа. Особенностью найденного им «закона звездообразования в галактических дисках» являлось также существование пороговой плотности газа, ниже которой закон Шмидта не выполнялся и вообще звездообразование затухало. Однако в каждой конкретной галактике эта пороговая плотность почему-то была своей: по выборке из 20 объектов диапазон значений пороговых плотностей газа получился от 3 до 12 масс Солнца на квадратный парсек. Существование такого порога плотности газа Кенникат связал с условием наступления гравитационной неустойчивости в газе, и тогда понятно, что общая динамика галактики тоже должна на него влиять, потому пороги разные в разных галактиках. В 1998 г. вышла еще одна знаменитая статья Кенниката [13]: уже по выборке из 61 галактики он уточнил $N = 1.4 \pm 0.15$. Значит, не нашим и не вашим, а показатель степени — полтора как Ларсон и Эльмегрин из простейших самогравитирующих моделей получали? В этой же статье Кенникат соглашался и на возможную заметную роль длительности характерного динамического времени, пропорционального периоду обращения диска галактики на данном радиусе: закон $\text{SFR} \propto \Sigma_{\text{gas}} \Omega(\text{gas})$ описывал данные лишь немногим хуже, чем $\text{SFR} \propto \Sigma_{\text{gas}}^{1.5}$.

Однако исследователей мучила непрямая связь между локальным распределением плотности нейтрального водорода и молекулярного газа; к 2000-м гг., после успехов интерферометрических наблюдений, которые позволили построить в галактиках детальные распределения молекулярного газа с пространственным разрешением, сравнимым с разрешением фотометрических наблюдений, в умах исследователей созрела революция: надо сравнивать локальные темпы звездообразования именно с локальным количеством молекулярного газа. В 2008 г. Бигбель со товарищи [14] показали, что темпы звездообразования отлично коррелируют с поверхностной плотностью молекулярного газа в первой степени, — четкая линейная связь! Ни-

какого порогового значения плотности для поджига звездообразования у молекулярного газа нет [15]! А еще раньше Гао и Соломон [16] продемонстрировали, что темпы звездообразования еще лучше, чем с CO, коррелируют с плотностью *очень плотного* молекулярного газа, измеряемого по линии молекулы HCN, и степень зависимости с плотностью этого самого плотного газа при этом тоже единица!

Живой, однако, осталась и идея о глобальном регулировании темпов звездообразования, связанном с динамическими свойствами галактики как целого. Действительно, если смотреть только на количество молекулярного газа, то эффективность звездообразования получается разной в галактиках так называемой «главной последовательности» (это подавляющее большинство дисковых галактик, у которых темпы звездообразования плавно меняются во времени и пропорциональны их звездной массе) и в галактиках с мощными вспышками звездообразования, такими, как ULIRG в местной Вселенной или субмиллиметровые галактики на красных смещениях 2—3 [17]. Однако если подключить сюда динамику, то можно составить единую последовательность $\text{SFR} \propto M_{\text{gas}}/\tau_{\text{dyn}}$ для всех галактик на разных красных смещениях. Интерпретация τ_{dyn} у разных теоретиков пока не устоялась: некоторые [13, 17] предпочитают орбитальный период во внешних областях галактики, некоторые (Крумхольц, например, [18]) — так называемое free-fall время, связанное с турбулентностью газа, но и старый добрый shear тоже никто не сбрасывает со счетов (команда Тана, например [19]).

И наконец, есть еще один критический момент, связанный с тем, что молекулярные облака, формирующие звезды, никак не могут считаться изолированными. Они не только самогравитирующие, они еще и находятся во внешнем гравитационном поле галактики. В больших спиральных галактиках в экваториальной плоскости диска доминирующим гравитирующим агентом является звездный компонент диска. Поэтому естественным выглядит предложение и обоснование «расширенного закона Шмидта» (extended Schmidt law), в котором локальные темпы звездообразования зависят не только от локальной плотности газа в некоей степени, но и от локальной плотности звезд, тоже в некоей, уже другой степени. Калибровки расширенного закона Шмидта с наблюдательными данными показали, что степень при поверхностной плотности звезд должна быть около 0.5 (квадратный корень) [20–22].

«Нормальное» звездообразование и «вспышки» звездообразования

Для того чтобы измерить темпы звездообразования в галактике, нужно пересчитать в ней молодые звезды. Самый простой подход к этой задаче — пересчитать *массивные* звезды, потому что массивные звезды живут мало, не больше двух-трех десятков миллионов лет, и по их количеству можно оценить, каковы были темпы звездообразования именно в течение этих недавних десятков миллионов лет. Но как пересчитать массивные звезды в далеких галактиках, которые не разрешаются в наблюдениях на отдельные звезды? В интегральном излучении галактик есть «индикаторы», которые позволяют оценить вклад массивных звезд в полное излучение галактики. Один из таких индикаторов был упомянут в предыдущем параграфе: это интегральное излучение в эмиссионной линии $\text{H}\alpha$. Зоны Стремгrena (области ионизованного теплого газа, излучающего в эмиссионных линиях, и прежде всего в водородных эмиссионных линиях) образуются только вокруг массивных звезд, массивнее 8—10 масс Солнца; следовательно, интегральный поток в эмиссионной линии $\text{H}\alpha$ прямо пропорционален количеству таких массивных звезд и, при фиксированной начальной функции масс звезд, полному текущему темпу звездообразования. Можно еще измерить поток от галактики в ультрафиолете, — туда вкладывают звезды, начитая с трех масс Солнца; следовательно, по интегральному потоку в ультрафиолете можно оценить средние темпы звездообразования в последние 100—200 млн лет.

Когда в 80-е гг. впервые со спутника IRAS был произведен обзор неба в четырех далеких инфракрасных полосах, недоступных наблюдениям с Земли, неожиданно выяснилось, что самые мощные события звездообразования плохо видны в оптике и в ультрафиолете, зато светят как фонари на 25, 60 и 100 мкм. Понятно, что данное излучение уже не принадлежит массивным звездам; это излучение пыли, нагретой самыми массивными звездами. Парадокс Вселенной состоит в том, что самые мощные вспышки звездообразования всегда сидят в пылевых коконах, поглощающих львиную долю их ультрафиолета. Поэтому самая честная оценка интенсивности звездообразования в галактике — комбинированная, а именно сумма оценок по ультрафиолету и по далекому инфракрасному излучению: часть ультрафиолета от массивных звезд до нас доходит напрямую, остальное поглощается и переизлучается пылью. Галактики с самым интенсив-

ным звездообразованием в ближней Вселенной, обнаруженные впервые как раз спутником IRAS, называются ULIRG (Ultra-Luminous InfraRed Galaxies). Это очень массивные галактики, как правило, с возмущенной структурой, вероятно, находящиеся в данный момент в процессе слияния; и все их интенсивное звездообразование, сотни масс Солнца в год, сосредоточено в компактной области, в центральном килопарсеке. В ближней Вселенной ULIRG — это галактики со вспышкой звездообразования: их текущие темпы звездообразования в разы или даже на порядок превосходят темпы звездообразования, средние за время их жизни. Причиной такого резкого и, вероятно, кратковременного повышения темпов звездообразования считается нарушение равновесия в газовом диске, спровоцированное бурной динамикой слияния галактик.

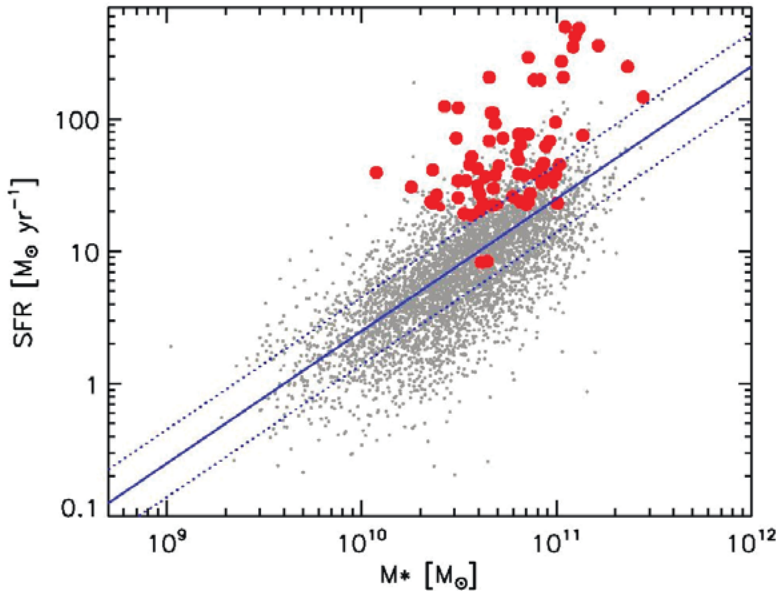


Рис. 1. Главная последовательность звездообразующих галактик и «выпадающие» случаи. Рисунок взят из статьи [23]

И вот тут чуть подробнее про уже упоминавшуюся «главную последовательность» звездообразующих галактик. О ней заговорили, когда для ближней Вселенной померили темпы звездообразования в десятках тысяч галактик — когда пошли массовые фотометрические обзоры галактик. Первым, и до сих пор главным, обзором ближней

Вселенной является SDSS (Sloan Digital Sky Survey), обеспечивший многоцветную фотометрию и спектры центральных областей для сотен тысяч галактик на четверти небесной сферы до красного смещения 0.2. К 2010 г. центр обработки данных SDSS в Мюнхене закончил и выпустил 7-й релиз, который включал не только измеренные потоки в разных длинах волн, но и результаты подгонки этих потоков самыми разными моделями. Впервые появились такие массовые таблицы свойств звездных населений, свойств возбуждения и химического состава газа, и темпов звездообразования, определенных по потоку в эмиссии H α . И тут обнаружилось с весьма весомой статистической убедительностью, что темпы звездообразования в большинстве галактик примерно пропорциональны их звездной («фотометрической») массе [24]. Такая зависимость указывает на плавно спадающую историю звездообразования, которая хорошо приближается экспонентой. Узкую зависимость, связывающую текущие темпы звездообразования и звездную массу галактик, назвали «главной последовательностью»; аналогия со звездами тут была такая: большая часть звезд тоже сидит на главной последовательности, и это самая «спокойная» стадия эволюции, без взрывов и вспышек. Позже последовало массовое измерение темпов звездообразования в близких галактиках по ультрафиолету, когда эти данные были получены в обзоре неба космическим телескопом GALEX. И снова большинство галактик оказалось на тесной, узкой «главной последовательности» [25, 26]. Пример этого распределения можно увидеть на рис. 1. Видно, что, кроме большинства галактик на главной последовательности, существуют еще немногочисленные компактные звездообразующие галактики, расположенные *выше* главной последовательности: в ближней Вселенной это ULIRG, галактики со вспышками звездообразования.

Интересно, что когда появились массовые измерения темпов звездообразования в галактиках на более далеких красных смещениях — сначала до $z = 1$, а потом и до $z \approx 3$, оказалось, что главная последовательность звездообразующих галактик сохраняется и там, на ранних стадиях эволюции Вселенной. Огромный вклад в измерения темпов звездообразования в далеких галактиках внес космический телескоп Herschel. Это был инфракрасный охлаждаемый космический телескоп с огромным зеркалом 3.5 м, и он измерял излучение галактик на длинах волн десятки и даже сотни микрон. Поскольку в лабораторной системе длин волн максимум излучения пыли, нагретой молодыми звездами, приходится на 100 мкм, наблюдения

телескопа Herschel позволили массово измерять темпы звездообразования по инфракрасному излучению пыли в галактиках вплоть до красного смещения 3—4. Оказалось, что главная последовательность как узкая зависимость между темпами звездообразования и звездной массой галактики сохраняется на больших красных смещениях, но сдвигается вверх! При той же массе галактики на $z = 1$ или $z = 2$ образуют звезды в несколько раз интенсивнее [27]. Параллельно изменяется с красным смещением и так называемое время истощения газа — частное от деления массы молекулярного газа на темп звездообразования в галактике. Если в ближней Вселенной у всех спиральных галактик, независимо от их массы и газового запаса, это время истощения около 2 млрд лет, то на красном смещении двойка — это уже всего полмиллиарда лет [28]! Но тесная зависимость между массой галактики и темпами звездообразования сохраняется. Немногочисленные галактики на $z = 2$ —3 «выпрыгивают» вверх от главной последовательности. Это так называемые субмиллиметровые галактики (SMG) — такие же массивные, как ULIRG, от ста миллиардов солнечных масс, только в звездной компоненте, и с такой же возмущенной морфологией; их также трактуют как продукт текущего слияния двух массивных галактик, богатых газом. Но основной вклад в полную «космическую» плотность звездообразования вносят все же не они, а куда более многочисленные галактики главной последовательности.

Космическая история звездообразования

Что такое «космическая история звездообразования»? Это изменение со временем, т. е. эволюция, суммарных темпов звездообразования во всех галактиках, заполняющих сопутствующую единицу объема Вселенной, например, в кубическом Мегапарсеке. Первый подход к оценке темпов звездообразования во всей Вселенной состоялся в середине 90-х гг. XX в., когда были обнародованы первые результаты «ковровых» обзоров далеких галактик. Еще до вступления в строй 8-метровых телескопов высокотехнологичный 3.6-метровый CFHT (Canada-France-Hawaii Telescope), установленный в обсерватории с прекрасным астроклиматом на горе Мауна Кеа на Гавайях, вел фотометрические и спектральные измерения полных выборок слабых галактик в избранных площадках. Таким образом были получены данные по эволюции функций светимости галактик вплоть до красного смещения $z = 1$ в нескольких широкополосных филь-

трах, относящихся к оптическому диапазону спектра [29–31]. И тут Пьеро Мадау со товарищи обратили внимание, что на красном смещении единица в голубой фильтр В на Земле уже въезжает ближний ультрафиолет в собственной системе длин волн галактики; а значит, просуммировав в фиксированном объеме все далекие галактики, светимость которых измерена на Земле в фильтре В, можно получить суммарный поток в ультрафиолете на красном смещении единица и по нему оценить плотность темпов звездообразования во Вселенной в ту далекую эпоху. Таким образом была получена первая оценка космической истории звездообразования [32]. И эта первая оценка сразу поразила астрономов: оказалось, что «космические темпы звездообразования» — суммарный темп формирования звезд в единице объема пространства в 1 кубический мегапарсек — падали почти вертикально последние 8 млрд лет: от $z = 1$ до $z = 0$ они упали в 7–10 раз. Далее Мадау с соавторами привлекли дополнительные данные и использовали дополнительные подходы (в частности, дифференциальные подсчеты галактик на 2 мкм, чтобы отследить нарастание массы звездного населения со временем) и построили космическую историю звездообразования уже до красного смещения 4 [33]; у них получилось, что максимум космической истории звездообразования приходится на $z = 1.5$, а далее, к более ранним эпохам, плотность темпов звездообразования падает.

Эти результаты получили большой резонанс в астрономическом сообществе; но и сомнения в правильности ранней космической истории звездообразования, в первые 3–4 млрд лет жизни Вселенной, нарисованной в [33], тоже были сильные и обоснованные. Дело в том, что еще в 90-е гг. появились результаты обзоров эллиптических галактик вплоть до красных смещений 0.5–1.0; и уже было известно, по измеренным темпам эволюции цвета этих галактик без звездообразования, что их старое звездное население было полностью сформировано к красному смещению 2–2.5. Таким образом, специалисты по звездному населению галактик предсказывали эпоху — короткую и раннюю, когда все массивные галактики ранних типов дружно формировали за время, меньшее 1 млрд лет, свои 100 млрд звезд каждая. Эту эпоху относили на $z \geq 3$. Данные предсказания никак не согласовывались с максимумом $SFR(z)$ на $z = 1.5$ и ее падением в сторону больших z . Претензии к методике Мадау были высказаны практически сразу: он никак не учитывал пыль на больших красных смещениях, которая должна была экранировать подсчеты далеких галактик. С одной стороны, он довольно логично оправдывал такой

подход: на ранних этапах эволюции, по логике развития нуклеосинтеза во Вселенной, металлов в газе было мало и пыли не из чего было формироваться. С другой стороны, было известно о существовании довольно заметного инфракрасного космического фона, и его также вполне логично приписывали пыли в неразрешенных далеких галактиках. Исправленная за пыль космическая история звездообразования уже казалась совершенно плоской на $z > 1.5$!

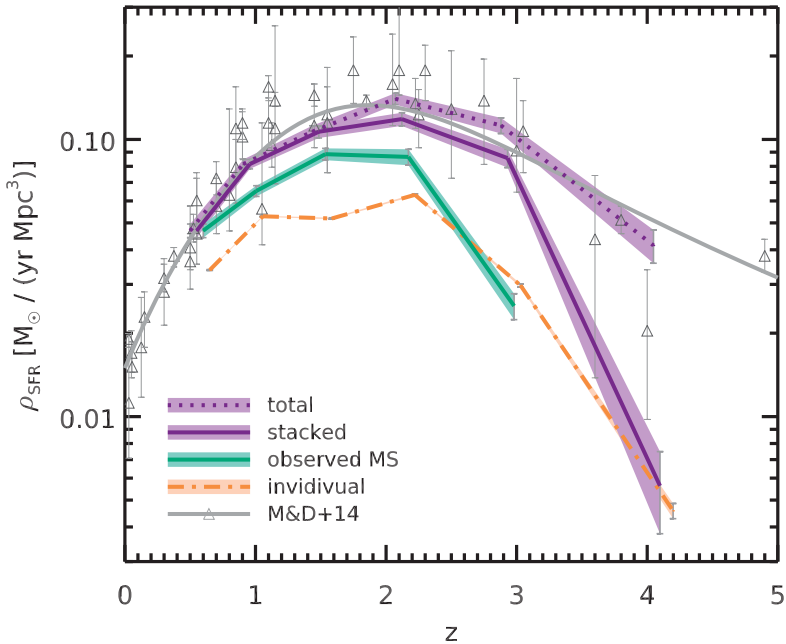


Рис. 2. Космическая история звездообразования, основанная на данных телескопа «Гершель». Рисунок взят из статьи [34]

Решающий вклад в исследование звездообразования на высоких красных смещениях вплоть до 3—4 внес инфракрасный космический телескоп «Гершель», запущенный Европейским космическим агентством в 2009 г. и проработавший при охлаждении жидким гелием вплоть до 2013 г. Телескоп «Гершель» был ориентирован на наблюдения в далеком инфракрасном диапазоне, от 60 мкм до субмиллиметров; комплекс его инструментов позволял строить распределения энергии в спектрах далеких галактик, относящиеся к пыли, нагретой звездообразованием. Именно после поступления результатов с

«Гершеля» был откалиброван и стал самым популярным индикатором темпов звездообразования суммарный поток в инфракрасном диапазоне, L_{tot} , который получался интегрированием распределения энергии в спектре в диапазоне от 8 до 1000 мкм [35]. «Гершель» в ходе 4 лет работы покрыл обзором примерно 10 % всей небесной сферы, и это были не случайно выбранные 10 %. Целенаправленно наблюдались площадки, для которых уже существовали глубокие многоцветные изображения в оптике: площадки обзоров GOODS, CANDELS, COSMOS. Наличие изображений высокого разрешения, полученных в том числе на Хаббловском космическом телескопе, облегчало отождествление инфракрасных источников «Гершеля» и позволяло строить для индивидуальных объектов распределения энергии в полном диапазоне электромагнитного излучения, что, в свою очередь, обеспечивало уверенные оценки как темпов звездообразования, так и красных смещений и звездных масс галактик. Были измерены десятки тысяч галактик в диапазоне красных смещений от 0 до 4! Окончательные результаты по оценке космической истории звездообразования для этого диапазона красных смещений представлены в [34]; обзор Мадау и Дикинсона по этим новым данным был годом раньше опубликован в Annual Reviews A&A [36].

Вселенная образовывала звезды с примерно постоянным темпом между $z = 3$ и $z = 1$, на уровне 0.1 масс Солнца в год в одном кубическом мегапарсеке сопутствующего объема. Абсолютный максимум плотности темпов звездообразования достигается вблизи $z = 2$. На $z < 1$ и в интервале $z = 3$ –4 наблюдается почти симметричный завал темпов звездообразования (правда, надо помнить, что между $z = 4$ и $z = 3$ прошел один миллиард лет, а между $z = 1$ и $z = 0$ — восемь!). Надо сказать, что плавное уменьшение плотности темпов звездообразования к началу времен сейчас прослеживается примерно до $z = 10$ [37]. И вплоть до $z = 5$ уже хватает статистики измеренных галактик, чтобы проследить эволюцию «главной последовательности» — почти линейной связи между темпом звездообразования и звездной массой галактики. Именно этот эпохальный результат позволил окончательно убедиться, что равноправные слияния галактик (большой мерджинг) — и сопровождающие их вспышки звездообразования — вносят пренебрежимо мало в космическую историю звездообразования. Основная мода звездообразования в га-

лактиках — плавная, требующая ламинарной постоянной подпитки газом извне. Отсюда и окончательная победа картины эволюции дисковых галактик с необходимостью постоянной аккреции внешнего холодного газа.

Библиографические ссылки

1. *Schmidt M.* The Rate of Star Formation // *Astrophys. J.* — 1959. — Vol. 129. — P. 243.
2. *Schmidt M.* Derivation of the initial luminosity function and the past rate of star formation // *The Hertzsprung-Russell Diagram* / ed. by Jesse Leonard Greenstein : IAU Symp. — 1959. — Vol. 10. — P. 99.
3. *Salpeter E. E.* The Luminosity Function and Stellar Evolution // *Astrophys. J.* — 1955. — Vol. 121. — P. 161.
4. *Larson R. B.* Numerical calculations of the dynamics of collapsing protostar // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1969. — Vol. 145. — P. 271.
5. *Larson R. B.* The evolution of spherical protostars with masses 0.25 M_{solar} to 10 M_{solar} // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1972. — Vol. 157. — P. 121.
6. *Larson R. B.* Calculations of three-dimensional collapse and fragmentation // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1978. — Vol. 184. — P. 69–85.
7. *Larson R. B.* Turbulence and star formation in molecular clouds // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1981. — Vol. 194. — P. 809–826.
8. *Larson R. B.* Mass spectra of young stars // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1982. — Vol. 200. — P. 159–174.
9. *Larson R. B.* Gravitational torques and star formation // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1984. — Vol. 206. — P. 197–207.
10. *Larson R. B.* Cloud fragmentation and stellar masses // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1985. — Vol. 214. — P. 379–398.
11. *Kennicutt Jr., R. C.* The rate of star formation in normal disk galaxies // *Astrophys. J.* — 1983. — Vol. 272. — P. 54–67.
12. *Kennicutt Jr., R. C.* The Star Formation Law in Galactic Disks // *Astrophys. J.* — 1989. — Vol. 344. — P. 685.
13. *Kennicutt Jr., R. C.* The Global Schmidt Law in Star-forming Galaxies // *Astrophys. J.* — 1998. — Vol. 498, № 2. — P. 541–552. [astro-ph/9712213](#).
14. *Bigiel F., Leroy A., Walter F. et al.* The Star Formation Law in Nearby Galaxies on Sub-Kpc Scales // *Astron. J.* — 2008. — Vol. 136, № 6. — P. 2846–2871. [0810.2541](#).

15. *Schruba A., Leroy A. K., Walter F. et al.* A Molecular Star Formation Law in the Atomic-gas-dominated Regime in Nearby Galaxies // *Astron. J.* — 2011. — Vol. 142, № 2. — P. 37. 1105.4605.
16. *Gao Y., Solomon P. M.* The Star Formation Rate and Dense Molecular Gas in Galaxies // *Astrophys. J.* — 2004. — Vol. 606, № 1. — P. 271–290. astro-ph/0310339.
17. *Daddi E., Elbaz D., Walter F. et al.* Different Star Formation Laws for Disks Versus Starbursts at Low and High Redshifts // *Astrophys. J. Lett.* — 2010. — Vol. 714, № 1. — P. L118–L122. 1003.3889.
18. *Krumholz M. R., Dekel A., McKee C. F.* A Universal, Local Star Formation Law in Galactic Clouds, nearby Galaxies, High-redshift Disks, and Starbursts // *Astrophys. J.* — 2012. — Vol. 745, № 1. — P. 69. 1109.4150.
19. *Suwannajak C., Tan J. C., Leroy A. K.* A Test of Star Formation Laws in Disk Galaxies. II. Dependence on Dynamical Properties // *Astrophys. J.* — 2014. — Vol. 787, № 1. — P. 68. 1404.1359.
20. *Dopita M. A., Ryder S. D.* On the Law of Star Formation in Disk Galaxies // *Astrophys. J.* — 1994. — Vol. 430. — P. 163.
21. *Shi Y., Helou G., Yan L. et al.* Extended Schmidt Law: Role of Existing Stars in Current Star Formation // *Astrophys. J.* — 2011. — Vol. 733, № 2. — P. 87. 1103.3711.
22. *Shi Y., Yan L., Armus L. et al.* Revisiting the Extended Schmidt Law: The Important Role of Existing Stars in Regulating Star Formation // *Astrophys. J.* — 2018. — Vol. 853, № 2. — P. 149. 1801.00888.
23. *Elbaz D., Dickinson M., Hwang H. S. et al.* GOODS-Herschel: an infrared main sequence for star-forming galaxies // *Astron. Astrophys.* — 2011. — Vol. 533. — P. A119. 1105.2537.
24. *Brinchmann J., Charlot S., White S. D. M. et al.* The physical properties of star-forming galaxies in the low-redshift Universe // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2004. — Vol. 351, № 4. — P. 1151–1179. astro-ph/0311060.
25. *Schiminovich D., Wyder T. K., Martin D. C. et al.* The UV-Optical Color Magnitude Diagram. II. Physical Properties and Morphological Evolution On and Off of a Star-forming Sequence // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* — 2007. — Vol. 173, № 2. — P. 315–341. 0711.4823.
26. *Salim S., Rich R. M., Charlot S. et al.* UV Star Formation Rates in the Local Universe // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* — 2007. — Vol. 173, № 2. — P. 267–292. 0704.3611.
27. *Noeske K. G., Weiner B. J., Faber S. M. et al.* Star Formation in AEGIS Field Galaxies since $z=1.1$: The Dominance of Gradually Declining Star Formation, and the Main Sequence of Star-forming Galaxies // *Astrophys. J. Lett.* — 2007. — Vol. 660, № 1. — P. L43–L46. astro-ph/0701924.

28. *Genzel R., Tacconi L. J., Gracia-Carpio J. et al.* A study of the gas-star formation relation over cosmic time // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2010. — Vol. 407, № 4. — P. 2091–2108. 1003.5180.
29. *Lilly S. J., Le Fevre O., Crampton D. et al.* The Canada-France Redshift Survey. I. Introduction to the Survey, Photometric Catalogs, and Surface Brightness Selection Effects // *Astrophys. J.* — 1995. — Vol. 455. — P. 50. astro-ph/9507010.
30. *Crampton D., Le Fevre O., Lilly S. J., Hammer F.* The Canada-France Redshift Survey. V. Global Properties of the Sample // *Astrophys. J.* — 1995. — Vol. 455. — P. 96. astro-ph/9507014.
31. *Lilly S. J., Tresse L., Hammer F. et al.* The Canada-France Redshift Survey. VI. Evolution of the Galaxy Luminosity Function to z approximately 1 // *Astrophys. J.* — 1995. — Vol. 455. — P. 108. astro-ph/9507079.
32. *Madau P., Ferguson H. C., Dickinson M. E. et al.* High-redshift galaxies in the Hubble Deep Field: colour selection and star formation history to $z \sim 4$ // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1996. — Vol. 283, № 4. — P. 1388–1404. astro-ph/9607172.
33. *Madau P., Pozzetti L., Dickinson M.* The Star Formation History of Field Galaxies // *Astrophys. J.* — 1998. — Vol. 498, № 1. — P. 106–116. astro-ph/9708220.
34. *Schreiber C., Pannella M., Elbaz D. et al.* The Herschel view of the dominant mode of galaxy growth from $z = 4$ to the present day // *Astron. Astrophys.* — 2015. — Vol. 575. — P. A74. 1409.5433.
35. *Kennicutt R. C., Evans N. J.* Star Formation in the Milky Way and Nearby Galaxies // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 2012. — Vol. 50. — P. 531–608. 1204.3552.
36. *Madau P., Dickinson M.* Cosmic Star-Formation History // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 2014. — Vol. 52. — P. 415–486. 1403.0007.
37. *Bouwens R. J., Illingworth G. D., Oesch P. A. et al.* UV Luminosity Functions at Redshifts $z = 4$ to $z = 10$: 10,000 Galaxies from HST Legacy Fields // *Astrophys. J.* — 2015. — Vol. 803, № 1. — P. 34. 1403.4295.

СРЕДНЯЯ И ВЕРХНЯЯ АТМОСФЕРА: ПРОБЛЕМЫ, ТРЕНДЫ, ЧАСТИЦЫ

О. С. Угольников

Институт космических исследований РАН

С середины XX в. в атмосфере Земли начали происходить быстрые изменения, которые ранее не фиксировались или не могли быть замечены ввиду скромных технических возможностей того времени. Самые масштабные и заметные из них — рост средней приземной температуры («глобальное потепление») и уменьшение общего содержания озона — в перспективе несли потенциальную угрозу для жизни на Земле. Наряду с ними обнаруживались и другие процессы, такие, как увеличение содержания ряда малых газовых примесей, а также различных твердых и жидких частиц. Все это охватывало не только приземные, но и высокие слои атмосферы. Быстрый и масштабный характер изменений указывал на их тесную взаимосвязь, а также на вероятные антропогенные причины, что обуславливало необходимость детального изучения и контроля состава всех слоев атмосферы. В настоящей лекции описывается современное состояние анализа долговременных трендов характеристик стратосферы и мезосферы Земли.

MIDDLE AND UPPER ATMOSPHERE: PROBLEMS, TRENDS, PARTICLES

O. S. Ugolnikov

Space Research Institute

Fast changes in Earth's atmosphere had started in the middle of 20th century. They didn't occur before or possibly were below the registration level for that time and technical possibilities. Most significant and noticeable effects as increase of near-ground temperature ("global warming") and decrease of total ozone column density were potentially dangerous for life on Earth. Along with these processes, the increase of abundance of small gas components and solid and liquid particles was detected. This happened not only near the ground, but also in upper atmospheric layers. Fast and significant character of these changes pointed to their interrelation and possible anthropogenic reasons. This makes the detailed atmospheric composition control necessary in all atmospheric layers. This work describes the present state of long-term trends in stratosphere and mesosphere of the Earth.

Парниковый эффект: две стороны медали

В XIX в., по мере уточнения величины расстояния до Солнца и его светимости, а также альбедо Земли, стало понятно, что условия на поверхности нашей планеты не соответствуют простому закону теплового баланса, средняя температура превосходит равновесное значение примерно на 35 К. Физическую суть процесса, который может существенно увеличить температуру поверхности без привлечения дополнительных источников энергии, впервые описал Жан-Батист Жозеф Фурье в 1827 г. [1]. Эффект, который теперь известен человечеству под названием «парниковый», состоял в частичном блокировании оттока тепла от какого-либо тела в окружающей его среде. Очевидно, что в случае Земли в качестве такой среды выступала ее газовая оболочка — атмосфера.

В 1861 г. английский физик Джон Тиндаль [2] проводил опыты по пропусканию инфракрасных (тепловых) лучей сквозь различные газы, имевшиеся в его лаборатории. Большая их часть, включая молекулярный азот и кислород, оказались совершенно прозрачными. Уже почти не надеясь на позитивный итог эксперимента, Тиндаль взял образец «угольного газа» — топлива, использовавшегося в бунзеновских горелках того времени и состоявшего из смеси метана и угарного газа. Эта смесь блокировала инфракрасное излучение

практически полностью. Похожий результат Тиндаль получил для продуктов горения «угольного газа» — водяного пара H_2O и двуокиси углерода CO_2 . Теперь мы знаем, что именно эти два газа и вносят определяющий вклад в парниковый эффект на Земле.

В самом конце XIX в. шведский физик Сванте Аррениус [3] связал исторические периоды оледенения на Земле с вариациями содержания углекислого газа в атмосфере. Этого газа в атмосфере сравнительно немного, порядка 0.03 %, и по вкладу в парниковый эффект он уступает водяному пару. Тем не менее нагрев поверхности Земли, вызванный углекислым газом, мог быть достаточно значительным, чтобы усилить испарение воды в океанах и тем самым увеличить уже суммарный парниковый эффект. Эта положительная обратная связь определяет резкую чувствительность средней температуры поверхности Земли к вариациям содержания диоксида углерода. Из нее сразу же следовало, что рост промышленности и увеличение выбросов CO_2 в атмосферу может вызвать дальнейшее потепление климата, которое, начиная с какого-то уровня, может стать опасным для жизни на Земле. Несколько десятилетий масштаб возможного потепления недооценивался, но со второй половины XX в. средняя температура перешла к стадии быстрого роста, достигающего 0.2 К за десятилетие.

Рост содержания диоксида углерода и вызванный им парниковый эффект в настоящее время — одна из самых актуальных проблем, стоящих перед всем человечеством, об этом написано большое количество книг и статей. В настоящей работе мы коснемся на первый взгляд неожиданного аспекта данной проблемы в приложении к более высоким слоям атмосферы Земли. В условиях существенно меньшей плотности атмосферы (и CO_2 в частности) диоксид углерода может оказаться оптически тонким в своих инфракрасных полосах, в том числе на длине волны около 15 мкм — основной полосе с точки зрения парникового эффекта, совпадающей по длине волны с максимумом теплового излучения Земли. В этом случае преобладающим может стать противоположный процесс — излучение молекул CO_2 , возбужденных в результате столкновений с другими частицами атмосферы. Эффект получил название «радиативное выхолаживание» и может приводить, как ни странно, к уменьшению температуры высоких слоев атмосферы [4, 5]. Он действительно был открыт, причем первые количественные оценки [6] (как потом выяснилось, существенно завышенные) приводили к величине порядка -1 К/год, что по модулю в 50 раз превосходило темп глобального

потепления у поверхности Земли! Если бы последнее происходило с такой скоростью, можно было бы говорить об угрозе конца земной цивилизации в самое ближайшее время.

Более точные оценки темпа уменьшения температуры (как экспериментальные, так и модельные, см., например, [7, 8]) зависят от сезона и высоты, достигая -0.2 К/год в летней мезосфере высоких широт. Как известно, за счет быстрого восходящего переноса и адиабатического охлаждения эта область и так является самой холодной в атмосфере и вообще на Земле, температура там может опускаться ниже $130\text{--}140$ К. Причиной дальнейшего охлаждения мезосферы считается двуокись углерода, концентрация которой там растет примерно на 0.5% в год, что быстрее, нежели у поверхности Земли [9].

Похолодание мезосферы приводит к весьма существенным эффектам. Быстрое уменьшение плотности воздуха с высотой, соответствующее низким температурам, означает разрежение более высокого атмосферного слоя — термосферы. Это может сказываться, в частности, на движении низкоорбитальных спутников, тормозящихся в верхних слоях атмосферы. Измерения температуры различных слоев атмосферы стало одной из основных задач нескольких орбитальных миссий, в частности, эксперимента SABER (Sounding of the Atmosphere Using Broadband Emission Radiometry [10]) на борту спутника TIMED (Thermosphere, Ionosphere, Mesosphere, Energetics and Dynamics, NASA), методика которого позволяет восстанавливать вертикальные профили температуры с высоким разрешением (порядка 0.4 км).

В начале XXI в. похолодание верхних слоев атмосферы несколько замедлилось, причины этого обсуждаются далее. Тем не менее, как видно на рис. 1, построенном по данным SABER для окрестностей Москвы на период июнь—июль в 2002—2019 гг., негативный тренд температуры сохраняется в большинстве слоев не только мезосферы, но и стратосферы.

Тренд исчезает только вблизи мезопаузы, на высотах $82\text{--}87$ км. Этот факт сам по себе интересен, ведь именно там летом возможно появление ледяных кристаллов, образующих летние полярные мезосферные или серебристые облака. Они не наблюдались в средних северных широтах до последних десятилетий XIX в., а в настоящее время видны регулярно в июне и июле. Данный факт часто указывается как наглядное свидетельство охлаждения верхней летней мезосферы. Тем не менее сейчас температурные тренды в этой области атмосферы незаметны, а связь роста частоты появления облаков с

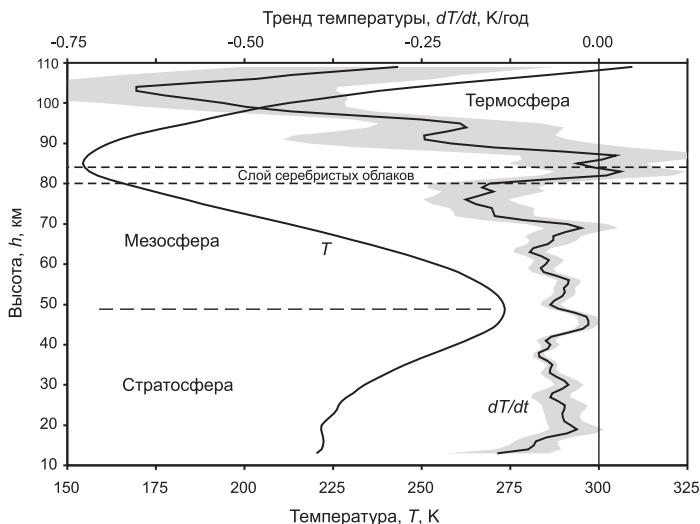


Рис. 1. Средний профиль температуры июня—июля и ее тренд в 2002—2019 гг. в окрестностях Москвы ($\pm 3^\circ$ по широте и $\pm 15^\circ$ по долготе) по спутниковым данным TIMED/SABER

температурой еще недостаточно хорошо изучена и характеризуется рядом противоречий (см., например, [11]). Этот вопрос будет рассматриваться в четвертой части настоящей работы.

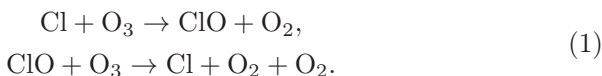
Озоновый щит: возвращение в новом облики?

В 80-е гг. XX в., в то же самое время, когда глобальное потепление заявило о себе в полную мощь, вскрылся еще один, еще более тревожный аспект влияния человека на состав атмосферы и условия жизни на Земле. Ежегодно над Антарктидой в сентябре—декабре (весенние месяцы для южного полушария) стало наблюдаться существенное, до 30—40 %, уменьшение общего содержания озона O_3 [12], которое с подачи журналистов вошло в обиход под названием «озоновая дыра».

Озон — малая газовая примесь в атмосфере Земли, большая часть которого располагается в стратосфере, на высотах от 10—12 до 40 км. Но и там его вклад составляет всего несколько миллионов частей по объему. Тем не менее этого оказывается достаточно, чтобы полностью заблокировать несовместимое с жизнью солнеч-

ное ультрафиолетовое излучение с длиной волны меньшей 290 нм и существенно ослабить более мягкий ультрафиолет в диапазоне 290—310 нм. Озон и его расположение в атмосфере вполне можно назвать «чудом Земли» или даже локальным проявлением антропоного принципа наряду с его глобальными факторами вроде значений мировых констант, оптимальных для возникновения галактик, звезд и, в конце концов, обитаемых планет. Озон — сильный окислитель и ядовитый газ, его присутствие в тропосфере в больших количествах представляло бы опасность. Он выполняет свои защитные функции в стратосфере, над слоем обитания живых организмов.

Причины сокращения количества озона были известны уже за 10 лет до появления «дыры» [13]. Как и для многих атмосферных изменений конца XX в., здесь не обошлось без вмешательства человека, а точнее — фреонов, газов, производимых для холодильных установок. Эти соединения углерода с галогенами отличаются высокой химической стойкостью, а попав в стратосферу, выпускают туда под действием солнечного излучения свободные атомы хлора и брома. Те, в свою очередь, каталитически разрушают озон:



Сам атом галогена при этом не уходит из системы, уничтожая за время жизни сотни тысяч молекул озона. В отличие от ситуации с парниковым эффектом знание этой схемы позволило человечеству принять быстрые меры. Несмотря на противодействие незаинтересованных сторон (особо отличилась американская компания DuPont, производившая фреоны и пытавшаяся поставить под сомнение эффективность хлорного цикла разрушения озона в научной литературе), были приняты Венская конвенция (1985) и Монреальский протокол (1987), ограничивающие и далее запрещающие производство хлор- и бромсодержащих фреонов. Они были заменены более дорогими, но безопасными для озона фторуглеводородами. Свободный фтор в атмосфере быстро забирает водород из молекул воды, образуя достаточно инертный фтороводород.

Принятые меры дали эффект через 10 лет: уменьшение содержания озона в атмосфере прекратилось, и в настоящее время его тренды примерно нулевые. Однако о восстановлении озонового слоя говорить еще рано, — выброшенные за многие десятилетия хлор и бром по-прежнему остаются в стратосфере. По прогнозам, возвращение озонового слоя к доиндустриальному уровню может произойти

только в середине XXI в. При этом его свойства и вертикальное распределение могут быть совершенно иными. Это определяется всеми изменениями, которые произойдут в атмосфере к этому времени, в частности — ростом содержания парниковых газов.

Здесь необходимо пояснить, почему «озоновая дыра» возникла именно в высоких южных широтах. Этому способствуют очень низкие зимние температуры в стратосфере над Антарктидой. Холодный воздух опускается вниз, образуя устойчивый полярный стратосферный вихрь, блокирующий приток воздуха с низких широт, где образуется озон. В условиях полярной ночи накопленный за лето озон сохраняется, но с началом весны распадается под действием солнечных лучей. Этот процесс усиливают холодные полярные стратосферные облака, содержащие соединения хлора и азота и выпускающие их окиси весной в атмосферу. Озоновая депрессия исчезает лишь к концу весны с распадом полярного вихря и испарением стратосферных облаков.

В высоких широтах северного полушария эти процессы менее интенсивны вследствие менее холодной стратосферы. Однако, как было описано в предыдущей главе и видно на рис. 1, под действием парниковых газов в стратосфере наблюдается отрицательный температурный тренд, поэтому возникновение озоновых депрессий в настоящем и будущем возможно и там, особенно при отсутствии контроля за выбросом галогеносодержащих соединений.

Со своей стороны озон также влияет на тепловые тренды атмосферы. Модельные расчеты [7, 14] показывают, что именно прекращение разрушения стратосферного озона на рубеже XX и XXI вв. стало фактором, замедлившим похолодание мезосферы и вообще остановившим его вблизи мезопаузы. Это же подтверждают и наблюдения [8].

Помимо вышеперечисленного тепловая структура тропосферы и стратосферы в существенной степени зависит от наличия в ней твердых и жидких частиц, которое, в свою очередь, также определяется содержанием малых газовых примесей, в том числе антропогенного происхождения. Об этом факторе речь пойдет в следующей части работы.

Земля станет Венерой?

Наряду с «большими ледниковыми периодами», очевидно, связанными с вариациями величины парникового эффекта и ставшими

целыми эпохами в истории нашей планеты, известны сравнительно кратковременные, но также весьма заметные похолодания на поверхности Земли. Случались они существенно чаще, и некоторые из них произошли недавно, сохранив после себя описания очевидцев. Заметную роль в истории нашей страны сыграли аномальные холода 1601—1603 гг., когда лето было коротким и дождливым, а снег мог держаться более чем по полгода. Климатические изменения вызвали неурожай и голод и фактически подтолкнули начало сложного периода в нашей истории, известного как Смутное время.

Сильные похолодания длительностью 3—5 лет не могут объясняться вариациями содержания парниковых газов, имеющих существенно большее время жизни в атмосфере. Другие возможные причины так называемых «малых ледниковых периодов» — вариации океанических течений, тренды солнечной активности — также привели бы к более длительным климатическим явлениям.

Самое сильное кратковременное похолодание на Земле в последние несколько веков случилось в 1816 г., названном потом «годом без лета», а в США — «тысяча восемьсот насмерть замерзшим» («eighteen hundred and frozen to death»). И лишь век спустя это похолодание связали с сильнейшим из всех наблюдавшихся на Земле извержением вулкана Тамбора [15]. Падение температуры было вызвано блокированием солнечных лучей вулканическим пеплом и другими продуктами извержения. Такое же объяснение (извержение вулкана Уайнапутина в Южной Америке в 1600 г.) было позже дано и холодным годам на Руси в начале XVII в.

Что интересно, сам темный пепел непосредственно наблюдался только первое время после извержения Тамборы, достаточно быстро выпадая на Землю. Гораздо дольше в атмосфере оставался светлый аэрозоль, придававший необычную пурпурную окраску вечерней и утренней заре. Еще большее внимание на него обратили в конце XIX в., после другого сильного извержения вулкана — Кракатау — в 1883 г. [16]. Связь с извержением казалась очевидной, но при этом дневное ясное небо выглядело по-обычному, визуально свет Солнца не казался ослабленным. Что это за субстанция, из чего она состоит и, главное, за счет чего остается в атмосфере в течение нескольких лет — оставалось непонятным еще почти целый век.

Исходя из условий освещения Солнцем во время сумерек, можно было сделать вывод, что аэрозоль вулканического происхождения находится на высотах до 15—20 км, как мы теперь понимаем — в стратосфере. Долгое время эти слои были совершенно недоступны

для каких-либо исследований, первые контактные измерения с борта аэростата состоялись в 60-е гг. XX в. [17]. Еще через 10 лет стал понятен химический состав аэрозольных частиц [18], он оказался аналогичным облакам в атмосфере Венеры. Частицы представляли собой капли концентрированного раствора серной кислоты! Хорошо отражая солнечный свет, они уменьшали его поток у поверхности Земли и тем самым охлаждажали нашу планету. В научной литературе эффект иногда называли «антипарниковым».

В отличие от полярных стратосферных облаков, появляющихся только вблизи полюсов и активно способствующих уничтожению озона, сульфатный аэрозоль может существовать и при более высоких температурах. Это позволяет ему охватывать большую часть стратосферы над поверхностью Земли, создавая эффект глобального похолодания после мощных извержений. Источником аэрозоля являлся вулканический сернистый газ SO_2 . При достаточной мощности выброса он попадает в стратосферу, где вступает в реакции с атомарным кислородом O , озоном O_3 и гидроксидом OH , образуя серную кислоту.

По стечению обстоятельств первые десятилетия активных аэростатных исследований стратосферного аэрозоля [19] пришлось на эпоху частых крупных извержений вулканов: Агунг, Эль-Чичон и, наконец, Пинатубо — самое мощное извержение XX в., также вызвавшее ощутимое падение средней температуры на поверхности Земли. Эффект от каждого извержения длился по 5—6 лет. В короткие интервалы между этими периодами было отмечено, что концентрация аэрозоля не падает до нуля, оставаясь на некотором примерно постоянном уровне [20]. Детальное изучение этого фонового аэрозоля стало возможным в самом конце XX в., когда стратосфера очистилась от продуктов выброса вулкана Пинатубо.

Первое десятилетие XXI в. проявило рост содержания фонового аэрозоля [21], что стало предметом оживленных дискуссий о возможных антропогенных причинах и этого явления. Действительно, сернистый газ также присутствует в промышленных выбросах, которые в последнее время существенно возросли, особенно в странах Юго-Восточной Азии [22]. Еще одним, даже более вероятным источником мог стать карбонилсульфид OCS [23]. Анализ антарктических льдов показал, что в настоящее время содержание этой примеси существенно больше, чем в доиндустриальную эпоху [24].

Что интересно, далеко не всеми учеными данная ситуация воспринималась как катастрофическая или хотя бы опасная. Пауль

Крутцен, ведущий специалист в области атмосферной химии, работа которого цитируется абзацем выше, предлагал даже искусственно увеличивать выбросы сернистого газа в стратосферу, чтобы создавать еще большее количество невулканического аэрозоля и тем самым сдерживать глобальное потепление. Сторонники такого подхода были и в России, хотя модельные расчеты показывали, что это потребует непрерывного и все более нарастающего выброса SO_2 в стратосферу, а любая остановка этого процесса вызовет скачкообразное потепление на поверхности Земли.

Если же говорить об уже замеченном росте содержания фоновых аэрозолей, то его антропогенная природа ставилась под сомнение [25], в качестве причины могли выступать извержения вулканов средней мощности, произошедшие в начале XXI в. (Рабаул, Касаточи, пик Сарычева, Эйяфьядлайокюдль, Набро). Следующее десятилетие оказалось более вулканически спокойным, и анализ тренда стратосферного аэрозоля мог дать ответ на этот вопрос.

Еще в начале 2010-х гг. на основе разных наблюдательных методов (аэростатное, удаленное лидарное и спутниковое зондирование) было отмечено некоторое уменьшение оптической толщины стратосферного аэрозоля [26, 27]. С 2011 г. начались регулярные широкоугольные измерения интенсивности и поляризации фона сумеречного неба в Подмоскowie. Разработанная методика [28] позволяет выделять эффект аэрозольного рассеяния в стратосфере и определять профиль и вертикальную оптическую толщину аэрозоля выше 15 км. Усредненные по годам результаты показаны на рис. 2 в сравнении с данными обзора [27]. Видны неплохое согласие (с небольшим сдвигом сумеречных данных вниз за счет превышения нижней границы интегрирования, 15 км, над тропопаузой) и уверенный негативный тренд, указывающий на вероятную вулканическую природу максимума содержания аэрозоля вблизи 2010 г. и подтверждающий оптимистичные выводы работы [25].

Данные 2019 г., приведенные на рис. 2, усреднены по периоду времени, охватывающему май и июнь. В последующие месяцы на территории России начали наблюдаться эффекты «пурпурных зорь», характерные для поствулканических периодов повышенного содержания аэрозоля. Высказывались предположения о связи этих явлений с извержением вулкана Райкоке на Курильских островах в июне 2019 г.

К сожалению, сложные погодные условия лета 2019 г. в Центральной России ограничили объем наблюдательных данных. На

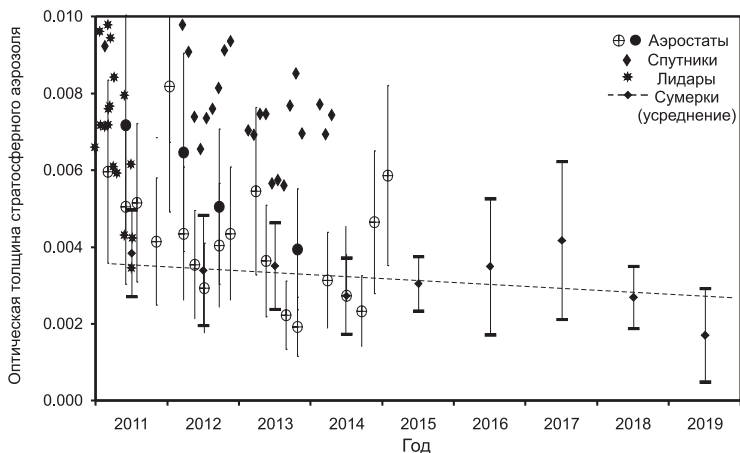


Рис. 2. Вертикальная оптическая толщина стратосферного аэрозоля выше 15 км на длине волны 540 нм по данным поляриметрии сумеречного неба в сравнении с обзором [27]

рис. 3 показаны высотные профили отношения аэрозольного и молекулярного ослабления на длине волны 540 нм в утренние сумерки 10 и 12 сентября в сравнении с усредненными данными на период с 2011 до начала лета 2019 г. Усиление аэрозольной компоненты очевидно, правда, оно больше выражено для верхней тропосферы (10 км), хотя и может задевать нижнюю стратосферу (необходимо еще раз отметить, что на рис. 3 показано отношение коэффициента аэрозольного рассеяния к молекулярному, а плотность воздуха на высоте 10 км примерно вдвое больше, чем на 15 км). Этот результат наглядно подтверждается эффектами резких теней от облаков и инверсионных следов самолетов, наблюдавшихся на фоне «пурпурных зорь» осенью 2019 г. Поэтому сумеречные эффекты 2019 г. следует считать скорее тропосферными, а их связь с вулканом Райкоке нуждается в дополнительной проверке.

Подводя итог сказанному в трех частях, можно сделать вывод, что ситуация с трендами параметров средней атмосферы в настоящее время внушает сдержанный оптимизм. Тем не менее все может быстро и кардинально измениться при отсутствии контроля за выбросами серосодержащих и галогеносодержащих соединений, а температурные изменения за счет парниковых газов и сейчас остаются весьма значительными. В следующей части будет рассмотрен один

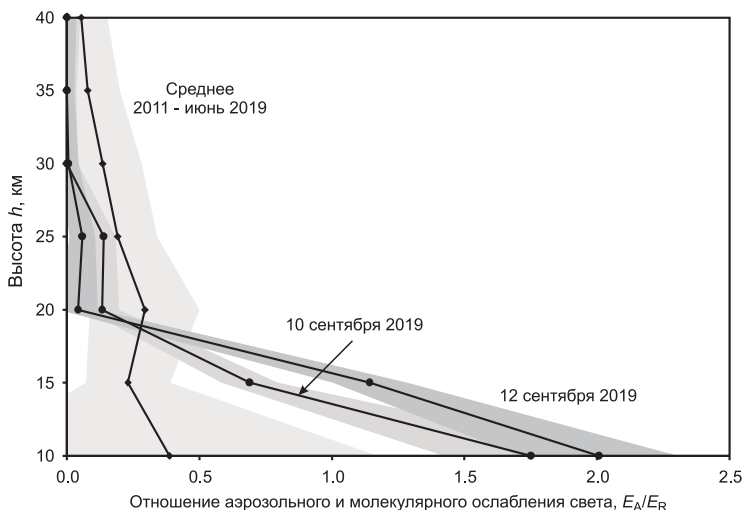


Рис. 3. Вертикальный профиль отношения аэрозольного и молекулярного ослабления в сентябре 2019 г. в сравнении с усредненным профилем с 2011 до начала лета 2019 г. по данным поляриметрии сумеречного неба

из самых неоднозначных и в то же время красивых эффектов, связанных с этим процессом.

Романтическое предупреждение

Короткие светлые ночи северных широт всегда считались одним из самых красивых и романтических моментов всего года. Казалось бы, это в равной степени было раньше, есть сейчас и останется в будущем. Но с конца XIX в. сначала редкими эпизодами, а потом все чаще и чаще красота летних северных ночей стала переходить на совершенно иной уровень. Вид неба существенно менялся, когда на фоне зари или даже на всем северном сегменте неба появлялись сияющие кружевные облака.

«Ночные светящиеся» или «серебристые» облака, как их называли на разных языках мира, были впервые обнаружены в 1885 г. [29] и казались поначалу тоже связанными с извержением вулкана Кракатау в 1883 г. Но высота облаков, определенная по условиям освещения Солнцем в сумерки (82 км), существенно превосходила известную нам сейчас высоту слоя вулканической пыли. Более того, серебри-

стые облака потом наблюдались и в вулканически спокойные периоды. Особенно выделялись аномально светлые ночи в Европе в конце июня — начале июля 1908 г., несомненно, связанные с Тунгусским явлением, а точнее — с выпадением в атмосферу пыли из головы и хвоста кометы, которой, вероятно, и являлось Тунгусское тело. Но чаще всего облака появлялись совершенно неожиданно.

Еще в начале XX в. было высказано предположение, что серебристые облака состоят из мельчайших частиц водяного льда [30], хотя подтвердить это удалось только целый век спустя в ходе работы орбитальной миссии UARS (Upper Atmosphere Research Satellite [31]). Образование льда в столь разреженной среде требует очень низких температур, что было удивительно, особенно для летних месяцев и круглосуточного освещения мезосферы Солнцем в этот сезон. О том, что именно летом мезосфера самая холодная и что ее температура год от года продолжает уменьшаться, т. е. о всем том, что описано в первой части настоящей работы, стало известно только во второй половине XX в. Серебристые облака — самые молодые в земной атмосфере — стали наглядным подтверждением негативных трендов температур в мезосфере.

Разумеется, на кристаллизацию льда влияют и другие факторы, в частности, содержание водяного пара, рост которого также указывался как возможная причина усиления образования облаков. Помимо этого более плотные и яркие облака могут появиться в период повышенной метеорной активности, создающей в мезосфере обилие ядер конденсации [32]. Самый яркий исторический пример этой связи — Тунгусское событие 1908 г. В настоящее время отмечено частое появление серебристых облаков во второй декаде августа, во время и после максимума активности метеорного потока Персеиды [33, 34], но только вблизи Северного полярного круга, где верхняя мезосфера в августе остается достаточно холодной для кристаллизации льда. Низкие температуры являются необходимым условием, вне зависимости от всех других факторов.

Частота появления серебристых облаков, оцененная на основе их визуальных наблюдений, уверенно возрастала по ходу XX в. [35]. Рост этой частоты вполне могли ощутить простые наблюдатели в средней полосе России в последнее время, особенно в 2018 и 2019 гг. Во второй половине XX в., с началом спутниковых наблюдений, были обнаружены практически круглогодичные полярные мезосферные облака в высоких широтах, поле которых расширялось от года к году [36]. Но при этом температура в слое облаков (82 км) в послед-

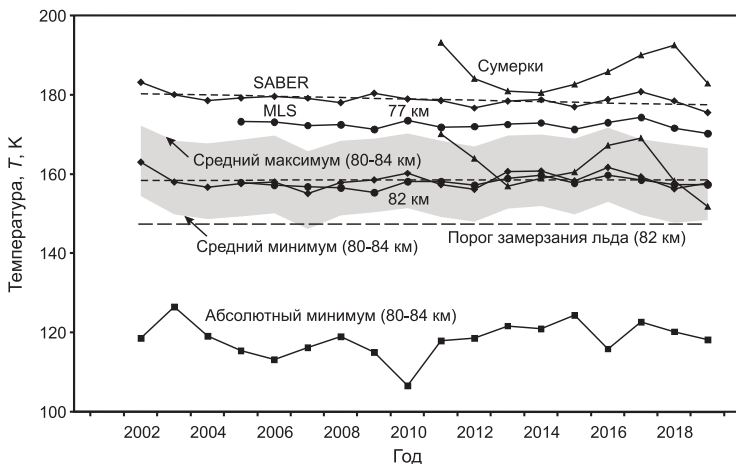


Рис. 4. Температура верхней мезосферы в июне—июле в окрестностях Москвы по спутниковым данным TIMED/SABER, EOS Aura/MLS и по результатам поляриметрии сумеречного неба

ние годы не проявляла сколь угодно заметного негативного тренда. Это видно на примере центральных районов России на рис. 1 и 4, где показаны средние значения температуры в июне и июле по спутниковым данным TIMED/SABER [10], EOS Aura/MLS [37], а также по данным фотометрии и поляриметрии сумеречного неба методом, разработанным автором настоящей работы [38]. Трендов роста содержания водяного пара на высоте 82 км, по данным EOS Aura/MLS, также не обнаруживается. Подобное противоречие, а также ненадежное визуальное определение трендов частоты появления серебристых облаков даже легли в основу вывода о невозможности анализа облаков как индикатора похолодания верхней мезосферы [11].

Путь решения этой проблемы представляется в анализе не частоты визуальных наблюдений облаков, а в измерении их физических характеристик, прежде всего средних размеров ледяных частиц. Знание этого параметра может помочь определить принципиальность фактора, повлиявшего на появление и яркость облаков. В частности, серебристые облака в августе 2015 и 2016 гг., наблюдавшиеся в северных регионах России [33, 34], были достаточно яркими, но состояли из частиц небольших размеров (средний радиус — не более 30 нм), что и позволило сделать выводы о большом числе частиц и вероятной связи с метеорным потоком Персеиды.

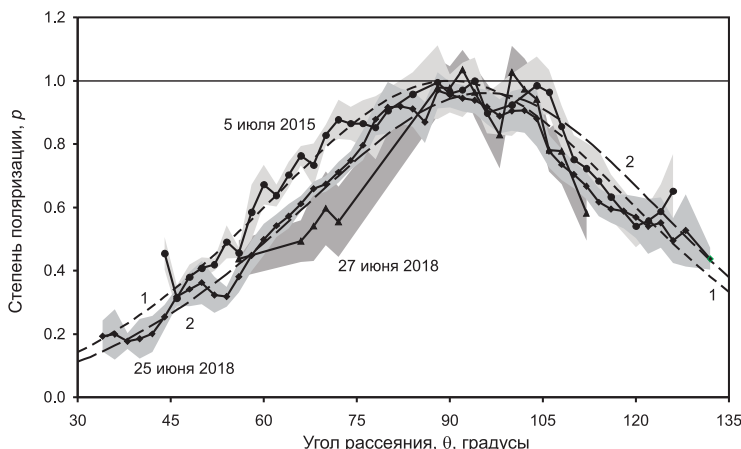


Рис. 5. Степень поляризации света, рассеянного серебристыми облаками, в зависимости от угла рассеяния. Кривая 1 соответствует малым частицам (релеевское рассеяние), кривая 2 — логнормальному распределению со средним радиусом 70 нм и шириной распределения $\sigma = 1.4$

В настоящее время размер частиц облаков измеряется посредством лидарного зондирования, а также с борта геофизических ракет и искусственных спутников Земли (см. ссылки в [33]). Эффективным способом определения размеров частиц с поверхности Земли является поляризационный анализ поля серебристых облаков на небе, если они занимают на нем большую видимую площадь, т. е. широкий диапазон углов рассеяния. Для этого могут быть использованы данные широкоугольных поляризационных камер, которые уже описывались выше при анализе стратосферного аэрозоля и мезосферных температур. Методика выделения поля облаков и определения поляризации подробно описана в [33, 39].

Ярчайшие серебристые облака за последние годы наблюдались в Центральной России 25—27 июня 2018 г. На рис. 5 показана зависимость степени поляризации облаков от угла рассеяния в сравнении с аналогичными данными для облаков 5 июля 2015 г. и релеевской кривой для очень малых частиц. Видно значимое отличие измеренных значений поляризации от релеевских, что привело к большой величине среднего радиуса — около 70 нм [39], соответствующего кривой 2 на рис. 5.

Как известно, способность малых частиц рассеивать излучение

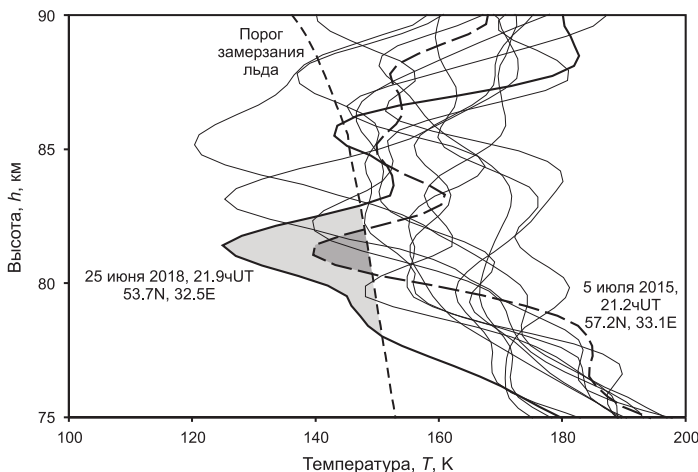


Рис. 6. Температурные профили в верхней мезосфере в окрестностях Москвы в интервале 15–30 июня 2018 г. в сравнении с профилем ночи с серебристыми облаками 5 июля 2015 г. Профиль температуры замерзания льда рассчитан по данным [40]

очень резко возрастает с их средним радиусом (пропорционально r^6). Полученное значение радиуса оказалось достаточным для объяснения аномальной яркости облаков и позволило, в частности, отвергнуть гипотезу об увеличении числа частиц и связи облаков с метеоритом Озерки, упавшим в 300 км от Москвы 21 июня 2018 г.

Чтобы понять возможную причину роста размеров частиц, необходимо подробно рассмотреть тепловую структуру верхней мезосферы в это время. Здесь нужно отметить, что общеизвестное представление мезосферы Земли как слоя с монотонным уменьшением температуры до минимума в мезопаузе является сильно упрощенным. Через мезосферу проходят и разрушаются акустико-гравитационные волны, вызванные возмущениями (неоднородными ветрами, циклонами, грозами и т. д.) в нижней атмосфере и увеличивающие свою амплитуду в ее верхних слоях. Они проявляются как колебания температуры в несколько десятков градусов, видимые на рис. 6. В результате таких перепадов выше и ниже температуры замерзания льда, также показанной на рис. 6, серебристые облака сами приобретают волновой узор.

Мы видим, что температура верхней мезосферы в летний период достаточно часто падает ниже 140 К, но облака появляются в тот

момент, когда эти минимумы опускаются существенно ниже «традиционной» мезопаузы, до высот 80—82 км. Это связано с тем, что на меньших высотах существенно выше концентрация водяного пара, и частицы по мере дрейфа через этот слой могут вырастать до размеров в 50 нм и больше [41]. Вследствие резкой зависимости коэффициента рассеяния от радиуса именно размер является принципиальным для появления визуальных облаков. Это хорошо видно для профиля вечера ярких облаков 25 июня 2018 г., когда слой с низкой температурой был особенно широким, что важно для роста частиц [42], а его нижняя граница опустилась до высоты в 78 км, наименьшей для всех профилей на рис. 6.

Найденное обстоятельство позволяет снять противоречие между трендами температуры и частоты появления серебристых облаков, описанное выше. Хотя средняя летняя температура в «стандартном» слое облаков (82 км) сейчас примерно постоянна, она уменьшается под этим слоем (негативные тренды температур на меньших высотах видны на рис. 1 и 4), все чаще создавая там условия для появления облаков с крупными частицами. Это можно трактовать как смещение постоянной по температуре мезопаузы на меньшие высоты, более богатые водяным паром. Если этот процесс продолжится в будущем, мы можем ожидать все более частого появления ярких серебристых облаков летними ночами. И хотя это очень красивое явление, необходимо помнить, что это фактическое следствие обогащения атмосферы парниковыми газами, описанного в первой части настоящей работы.

Заключение

Человечество вступило в эпоху, когда его воздействие на атмосферу способно вызывать существенное изменение ее характеристик за время, значительно меньшее периода естественной релаксации этих свойств. Это привело не только к макроскопическим изменениям в различных слоях атмосферы, но даже к появлению в ней качественно новых или ненаблюдаемых ранее объектов вроде серебристых облаков.

Все эти обстоятельства делают необходимым контроль состояния атмосферы, включая ее верхние слои, а также развитие моделей, которые могли бы предсказать эволюцию атмосферы в будущем в зависимости от сценария различных естественных и антропогенных воздействий. Наряду с новыми возможностями, появившимися на

рубеже тысячелетий (прежде всего непрерывным спутниковым мониторингом атмосферы), актуальность сохраняют и локальные наземные методы.

Автор работы выражает благодарность И. А. Маслову (ИКИ РАН) за плодотворное 20-летнее сотрудничество, создание приборов и поляризационный обзор фона неба и А. Г. Феофилову (Лаборатория динамической метеорологии, Университет Сорбонна, Франция) за ценные замечания, предоставление доступа и помощь с анализом спутниковых данных о составе атмосферы миссии TIMED/SABER.

Библиографические ссылки

1. *Fourier J.* Memoire sur les temperatures du globe terrestre et des espaces planetaires // Memoires de l'Academie royale des sciences de l'Institut de France. — 1827. — Vol. 7. — P. 570.
2. *Tyndall J.* On the Absorption and Radiation of Heat by Gases and Vapours... // Philosophical Magazine. — 1861. — Vol. 22. — P. 169.
3. *Arrhenius S.* On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground // Philosophical Magazine and Journal of Science. — 1896. — Vol. 41. — P. 237.
4. *Houghton J. T.* Absorption and emission by carbon dioxide in the mesosphere // Quart. J. Royal Met. Soc. — 1970. — Vol. 96. — P. 767.
5. *Roble R. G., Dickinson R. E.* How will changes in carbon dioxide and methane modify the mean structure of the mesosphere and thermosphere? // Geophys. Res. Lett. — 1989. — Vol. 16. — P. 1441.
6. *Kokin G. A., Lysenko E. V.* On temperature trends of the atmosphere from rocket and radiosonde data // J. Atmos. Terr. Phys. — 1994. — Vol. 56. — P. 1035.
7. *Lubken F.-J., Berger U., Baumgarten G.* Temperature trends in the mid-latitude summer mesosphere // J. Geophys. Res. — 2013. — Vol. 118. — P. 13347.
8. *Yuan T., Solomon S. C., She C.-Y. et al.* The Long-Term Trends of Nocturnal Mesopause Temperature and Altitude Revealed by Na Lidar Observations Between 1990 and 2018 at Midlatitude // J. Geophys. Res. — 2019. — Vol. 124. — P. 5970.
9. *Qian L., Burns A. G., Solomon S. C., Wang W.* Carbon dioxide trends in the mesosphere and lower thermosphere // J. Geophys. Res. Space Phys. — 2017. — Vol. 122. — P. 4474.
10. *Russell J. M., Mlynczak M. G., Gordley L. L. et al.* An overview of the SABER experiment and preliminary calibration results // Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng. — 1999. — Vol. 3756. — P. 277.

11. *Danilov A. D.* Long-term trends in upper atmosphere and ionosphere (review) // *Geomagnetism and aeronomy*. — 2012. — Vol. 52. — P. 291.
12. *Farman J. C., Gardiner B. G., Shanklin J. D.* Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClOx/NOx interaction // *Nature*. — 1985. — Vol. 315. — P. 207.
13. *Molina M. J., Rowland F. S.* Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom-catalysed destruction of ozone // *Nature*. — 1974. — Vol. 249. — P. 810.
14. *Akmaev R. A., Fomichev V. I., Zhu X.* Impact of middle-atmospheric composition changes on greenhouse cooling in the upper atmosphere // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* — 2006. — Vol. 68. — P. 1879.
15. *Humphreys W. J.* *Physics of the Air*. — Philadelphia : Franklin Institute of the State of Pennsylvania, 1920.
16. *Clark J. E.* The remarkable sunsets // *Nature*. — 1883. — Vol. 29. — P. 130.
17. *Junge C. E., Changnon C. W., Manson J. E.* Stratospheric aerosols // *J. Meteorol.* — 1961. — Vol. 18. — P. 81.
18. *Rosen J. M.* The boiling point of stratospheric aerosols // *J. Appl. Meteorol.* — 1971. — Vol. 10. — P. 1044.
19. *Deshler T., Hervig M. E., Hofmann D. J. et al.* Thirty years of in situ stratospheric aerosol size distribution measurements from Laramie, Wyoming (41 N), using balloon-borne instruments // *J. Geophys. Res.* — 2003. — Vol. 108. — P. D54167.
20. *Deshler T., Anderson-Sprecher R., Jager H. et al.* Trends in the nonvolcanic component of stratospheric aerosol over the period 1971-2004 // *J. Geophys. Res.* — 2006. — Vol. 111. — P. D01201.
21. *Solomon S., Daniel J. S., Neely R. R. et al.* The persistently variable “background” stratospheric aerosol layer and global climate change // *Science*. — 2011. — Vol. 333. — P. 866.
22. *Lu Z., Streets D. G., Zhang Q. et al.* Sulfur dioxide emissions in China and sulfur trends in East Asia since 2000 // *Atm. Chem. Phys.* — 2010. — Vol. 10. — P. 6311.
23. *Crutzen P. J.* The possible importance of CSO for the sulfate layer of the stratosphere // *Geophys. Res. Lett.* — 1976. — Vol. 3. — P. 73.
24. *Aydin M., Fudge T. J., Verhulst K. R. et al.* Carbonyl sulfide hydrolysis in Antarctic ice cores and an atmospheric history for the last 8000 years // *J. Geophys. Res.* — 2014. — Vol. 119. — P. 8500.
25. *Neely R. R., Toon O. B., Solomon S. et al.* Recent anthropogenic increases in SO₂ from Asia have minimal impact on stratospheric aerosol // *Geophys. Res. Lett.* — 2013. — Vol. 40. — P. 999.

26. *Ridley D. A., Solomon S., Barnes J. E. et al.* Total volcanic stratospheric aerosol optical depths and implications for global climate change // *Geophys. Res. Lett.* — 2014. — Vol. 41. — P. 7763.
27. *Kremser S., Thomason L. W., von Hobe M. et al.* Stratospheric aerosol — Observations, processes, and impact on climate // *Reviews of Geophysics.* — 2016. — Vol. 54. — P. 278.
28. *Ugolnikov O. S., Maslov I. A.* Optical depth and altitude profiles of stratospheric aerosol based on multi-year polarization measurements of the twilight sky // *Journal of Aerosol Science.* — 2019. — Vol. 127. — P. 93.
29. *Leslie R. C.* Sky Glows // *Nature.* — 1885. — Vol. 32. — P. 245.
30. *Wegener A.* Die Erforschung der obersten Atmosphärenschichten // *Gerl. Beitrage Geophys.* — 1912. — Vol. 11. — P. 102.
31. *Hervig M., Thompson R. E., McHugh M. et al.* First confirmation that water ice is the primary component of polar mesospheric clouds // *Geophys. Res. Lett.* — 2001. — Vol. 28. — P. 917.
32. *Hunten D. M., Turco R. P., Toon O. B.* Smoke and dust particles of meteoric origin in the mesosphere and stratosphere // *J. Atmos. Sci.* — 1980. — Vol. 37. — P. 1342.
33. *Ugolnikov O. S., Maslov I. A., Kozelov B. V., Dlugach J. M.* Noctilucent cloud polarimetry: Twilight measurements in a wide range of scattering angles // *Plan. Space Sci.* — 2016. — Vol. 125. — P. 105.
34. *Ugolnikov O. S., Galkin A. A., Pilgaev S. V., Roldugin A. V.* Noctilucent cloud particle size determination based on multi-wavelength all-sky analysis // *Plan. Space Sci.* — 2017. — Vol. 146. — P. 10.
35. *Thomas G. E., Olivero J.* Noctilucent clouds as the possible indicators of global change in the mesosphere // *Adv. Space Res.* — 2001. — Vol. 28. — P. 937.
36. *DeLand M. T., Shettle E. P., Thomas G. E., Olivero J. J.* Latitude-dependent long-term variations in polar mesospheric clouds from SBUV version 3 PMC data // *J. Geophys. Res.* — 2001. — Vol. 112. — P. D10315.
37. *Schwartz M. J., Lambert A., Manney G. L. et al.* Validation of the Aura Microwave Limb Sounder temperature and geopotential height measurements // *J. Geophys. Res.* — 2008. — Vol. 113. — P. D15S11.
38. *Ugolnikov O. S., Maslov I. A.* Summer mesosphere temperature distribution from wide-angle polarization measurements of the twilight sky // *J. Atmos. Terr. Phys.* — 2013. — Vol. 105. — P. 8.
39. *Ugolnikov O. S., Maslov I. A.* Polarization analysis and probable origin of bright noctilucent clouds with large particles in June 2018 // *Plan. Space Sci.* (in press). — 2019.

40. *Murphy D. M., Koop T.* Review of the vapour pressures of ice and supercooled water for atmospheric applications // Quart. J. Royal Meterol. Soc. — 2005. — Vol. 131. — P. 1539.
41. *Rusch D., Thomas G., Merkel A. et al.* Large ice particles associated with small ice water content observed by AIM CIPS imagery of polar mesospheric clouds: evidence for microphysical coupling with small-scale dynamics // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. — 2017. — Vol. 162. — P. 97.
42. *Feofilov A. G., Petelina S. V.* Relation between mesospheric ice clouds, temperature, and water vapor determined from Odin/OSIRIS and TIMED/SABER data // J. Geophys. Res. — 2010. — Vol. 115. — P. D18305.

СЕМЕЙСТВО МЕТРИК В ПРОСТРАНСТВАХ КЕПЛЕРОВЫХ ОРБИТ

К. В. Холшевников

*Санкт-Петербургский государственный университет,
Институт прикладной астрономии РАН*

Рассматриваются пятимерное пространство непрямолинейных кеплеровых орбит и четыре его фактор-пространства. В последних отождествляются орбиты вне зависимости от значений долгот узлов, значений аргументов перицентров, значений долгот узлов и аргументов перицентров, значений долгот узлов и аргументов перицентров при фиксированных долготах перицентров. Все указанные пространства (за исключением последнего) превращаются в метрические введением подходящих метрик. Приводятся рабочие формулы для вычисления расстояний между орбитами по их кеплеровым элементам. Что касается последнего фактор-пространства, то построенная для него функция пары орбит удовлетворяет первым двум аксиомам метрического пространства. Справедливость третьей аксиомы (аксиомы треугольника) пока не доказана и не опровергнута. Введенные пространства орбит вместе с метриками являются хорошим инструментом для задач поиска близких орбит и отождествления родительских тел в кометно-астероидно-метеороидных комплексах.

FAMILY OF METRICS IN THE SPACE OF KEPLERIAN ORBITS

K. V. Kholoshevnikov

Saint-Petersburg State University,

Institute of Applied Astronomy Russian Academy of Sciences

Five-dimensional space of non-rectilinear Keplerian orbits is considered, as well as four its quotient spaces. In the last ones orbits are identified irrespective of values of longitudes of nodes, values of arguments of pericentres, values of both longitudes of nodes and arguments of pericentres, values of longitudes of nodes and arguments of pericentres under fixed values of longitudes of pericentres. All these spaces (except the last one) becomes metric spaces by introducing a suitable metric. Usable formulae for calculation of distances between orbits via their Keplerian elements are given. As to the last quotient space, the constructed for it function of a pair of orbits satisfies first two axioms of metric spaces. The validity of the third axiom (triangle axiom) is not demonstrated or disproved yet. The introduced orbital spaces, together with metrics, serve as a good tool for problems of searching close orbits, and identification of parent bodies in comet-asteroid-meteoroid complexes.

Введение

Во многих областях астрономии требуется оценить близость кеплеровых орбит $\mathcal{E}_s(\epsilon_k)$ как точек в некотором 5-мерном пространстве \mathbb{H} . Чаще всего сравниваются две орбиты, и тогда $s = 1, 2$; ϵ_k — пять независимых элементов, однозначно определяющих орбиту. Полезно также сравнивать не только сами орбиты, но и их семейства. Последние обычно определяются как совокупность орбит с одинаковыми элементами $\epsilon_1, \dots, \epsilon_{\bar{k}}$ и произвольными $\epsilon_{\bar{k}+1}, \dots, \epsilon_5$, $1 \leq \bar{k} < k$. Указанные семейства трактуются как точки в \bar{k} -мерном пространстве, $1 \leq \bar{k} < k$, называемым фактор-пространством по отношению к \mathbb{H} .

Оптимальным способом установления близости орбит является введение расстояния $\varrho(\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2)$, превращающего \mathbb{H} и его фактор-пространства в метрические. Однако в прошлом веке пользовались

так называемыми критериями Саутворта—Хокинза, Драммонда, Йо-пека [1–6]. Как выяснилось, ни один из этих критериев не является расстоянием, поскольку не удовлетворяет аксиоме треугольника метрического пространства [7, 8], хотя и удовлетворяет (по крайней мере в пространствах орбит с ограниченным эксцентриситетом) ослабленной аксиоме треугольника [9]. Между тем в этом веке было предложено несколько настоящих метрик, свойства их исследованы, о чем мы рассказывали на 30, 35 и 45-й конференции *Физика космоса* [7, 10, 11]. Нам кажется, пришло время забыть о несовершенных критериях и выбрать среди метрик лучшую. Эта метрика (и метрики в трех фактор-пространствах) описывается в настоящей статье.

Замечание. Метрики сравниваются по различным свойствам, наилучшая по всем свойствам вряд ли существует. Мы сознаем некоторую субъективность подхода. Возможно, через некоторое время появится более привлекательная метрика, что можно только приветствовать.

Основные определения

Пространство \mathbb{X} называется метрическим, если в нем определена функция $\varrho(x_1, x_2)$, $x_s \in \mathbb{X}$, удовлетворяющая трем аксиомам метрического пространства [12, §9.1], [13]:

1. $\varrho(x_1, x_2) \geq 0$, причем $\varrho(x_1, x_2) = 0$ тогда и только тогда, когда $x_1 = x_2$;
2. $\varrho(x_1, x_2) = \varrho(x_2, x_1)$;
3. $\varrho(x_1, x_3) \leq \varrho(x_1, x_2) + \varrho(x_2, x_3)$ (аксиома треугольника).

Функцию ϱ называют *расстоянием*, или *метрикой*.

Различных пространств кеплеровых орбит существует бесконечно много. Важнейших — два: пространство всех орбит \mathbb{H}^* и пространство непрямолинейных орбит \mathbb{H} . Первое встречается редко в практике астрономических исследований, метрика там сложнее, и мы сосредоточим свое внимание на пространстве \mathbb{H} . Его главный недостаток (с математической точки зрения) — неполнота — не влияет на астрономические приложения.

Каждая орбита $\mathcal{E} \in \mathbb{H}$ однозначно определяется набором пяти элементов ϵ_k , за которые мы примем p, e, i, Ω, ω — фокальный параметр, эксцентриситет, наклон, долготу восходящего узла, аргумент перицентра. Обратно, набор элементов однозначно определяет орбиту с необходимыми оговорками. Именно, считаем $p > 0$, $e \geq 0$,

$0 \leq i \leq \pi$; при $i = 0$ или $i = \pi$ примем $\Omega = 0$; при $e = 0$ примем $\omega = 0$. С другой стороны, каждая орбита $\mathcal{E} \in \mathbb{H}$ взаимно-однозначно определяется двумя ортогональными векторами \mathbf{u}, \mathbf{v} , $\mathbf{u} \neq 0$, пропорциональными вектору момента импульса и вектору Лапласа—Рунге—Ленца соответственно. Мы примем

$$\mathbf{u} = (u_x, u_y, u_z), \quad \mathbf{v} = (v_x, v_y, v_z), \quad |\mathbf{u}| = \sqrt{p}, \quad |\mathbf{v}| = e\sqrt{p}, \quad (1)$$

$$\mathbf{uv} = u_x v_x + u_y v_y + u_z v_z = 0, \quad |\mathbf{u}| > 0. \quad (2)$$

Здесь

$$\begin{aligned} u_x &= \sqrt{p} \sin i \sin \Omega, & v_x &= e\sqrt{p}(\cos \omega \cos \Omega - \cos i \sin \omega \sin \Omega), \\ u_y &= -\sqrt{p} \sin i \cos \Omega, & v_y &= e\sqrt{p}(\cos \omega \sin \Omega + \cos i \sin \omega \cos \Omega), \\ u_z &= \sqrt{p} \cos i, & v_z &= e\sqrt{p} \sin i \sin \omega. \end{aligned} \quad (3)$$

Пространство \mathbb{H} открыто, локально-компактно, линейно-связно без особых точек. Оно вложено в \mathbb{R}^6 , являясь 5-мерной поверхностью второго порядка (конусом) $\mathbf{uv} = 0$ без 3-мерной плоскости $\mathbf{u} = 0$. Определим расстояние в пространстве \mathbb{H} евклидовым расстоянием в объемлющем пространстве \mathbb{R}^6 :

$$\varrho_2(\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2) = \sqrt{\frac{(\mathbf{u}_1 - \mathbf{u}_2)^2 + (\mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_2)^2}{L}}, \quad (4)$$

где $\mathbf{u}_k = \mathbf{u}(\mathcal{E}_k)$; $\mathbf{v}_k = \mathbf{v}(\mathcal{E}_k)$; L — произвольный положительный масштабный множитель. Подчеркнем, что функция (4) определена и не имеет особенностей во всем пространстве \mathbb{H} , включающем все эллиптические, параболические и гиперболические орбиты.

Замечание 1. Мы сохраняем нумерацию метрик из [8].

Замечание 2. Можно положить $L = 1$, и тогда физическая размерность ϱ_2 будет корнем из единицы длины. Например,

$$\begin{aligned} (\text{a. e.})^{1/2} &= 153.149\,264\,8 R_{\oplus}^{1/2} = 386.778\,891\,7 (\text{Мм})^{1/2} = \\ &= 12\,231.022\,49 (\text{км})^{1/2} = 386\,778.891\,7 (\text{м})^{1/2}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $R_{\oplus} = 6\,378\,164\,222$ мм — экваториальный радиус общего земного эллипсоида [14]. Разумеется, можно предложить метрику, использующую единицы длины. Достаточно в (1, 2, 3) заменить \sqrt{p} на p . Но мы не будем делать этого ради сохранения физического смысла вектора \mathbf{u} — момента импульса с точностью до постоянного нормирующего множителя.

Если желательно сделать ϱ_2 безразмерным, следует придать L размерность длины. Важно, что L здесь является лишь масштабным множителем и не играет роли при сравнении расстояний в каком-либо естественном ансамбле орбит. Для метеороидных потоков разумно считать $L = 1$ а. е., а для транснептуновых объектов $L = 40$ а. е. Ниже считаем $L = 1$.

Приведем формулу для определения метрики по известным элементам. Все предложенные нами расстояния ϱ_k вычисляются по формуле

$$\varrho_k^2 = (1 + e_1^2)p_1 + (1 + e_2^2)p_2 - 2\zeta_k\sqrt{p_1p_2}, \quad (6)$$

где ζ_k зависит от элементов e, i, Ω, ω двух орбит. При $k = 2$

$$\zeta_2 = \cos I + e_1e_2 \cos P. \quad (7)$$

Здесь I — угол между векторами $\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2$; P — угол между векторами $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2$. Если хотя бы одна из орбит круговая, то угол P не определен, но $\zeta_2 = \cos I$ и в этом случае определена однозначно. Выпишем формулы для косинусов:

$$\cos I = c_1c_2 + s_1s_2 \cos \Delta, \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \cos P = & s_1s_2 \sin \omega_1 \sin \omega_2 + (\cos \omega_1 \cos \omega_2 + c_1c_2 \sin \omega_1 \sin \omega_2) \cos \Delta + \\ & + (c_2 \cos \omega_1 \sin \omega_2 - c_1 \sin \omega_1 \cos \omega_2) \sin \Delta, \end{aligned} \quad (9)$$

где $c = \cos i$; $s = \sin i$; $\Delta = \Omega_1 - \Omega_2$.

Даламберовость [15] функции ϱ_2^2 относительно пар (s, Ω) и $(e, \Omega + \omega)$ доказывается элементарно.

Метрики в фактор-пространствах

Напомним определение. Пусть в пространстве \mathbb{X} введена некоторая эквивалентность. Фактор-пространством \mathbb{Y} называется множество, элементами y которого служат классы элементов $x \in \mathbb{X}$, эквивалентных друг другу. Например, на сфере можно отождествить точки с одинаковой широтой. Фактор-пространством будет множество параллелей (или, что то же, множество их широт, т. е. отрезок $-\pi/2 \leq y \leq \pi/2$). При отождествлении точек с одинаковой долготой фактор-пространством будет множество меридианов (или, что то же, множество их долгот, т. е. единичная окружность, экватор).

Для метрического пространства его фактор-пространство метризуемо введением метрики Хаусдорфа [16]. Последняя сложна, и мы будем использовать другие метрики.

Вернемся к пространству \mathbb{H} . Часто, хотя и не всегда, узлы орбит имеют большие вековые возмущения, тогда как остальные четыре элемента орбиты меняются незначительно. Полезно поэтому иногда игнорировать узлы, или, что то же, отождествлять орбиты с одинаковыми p, e, i, ω вне зависимости от значений Ω . Это достигается введением 4-мерного фактор-пространства \mathbb{H}_3 , элементом которого является класс орбит с фиксированными p, e, i, ω и всевозможными значениями Ω . В фактор-пространстве \mathbb{H}_3 введем расстояние

$$\varrho_3 = \min_{\Omega_1, \Omega_2} \varrho_2. \quad (10)$$

Согласно [8] оно дается формулой (6) при

$$\xi_3 = c_1 c_2 + e_1 e_2 s_1 s_2 \sin \omega_1 \sin \omega_2 + \sqrt{s_1^2 s_2^2 + e_1 e_2} \xi, \quad (11)$$

где

$$\begin{aligned} \xi = e_1 e_2 (1 - s_1^2 \sin^2 \omega_1) (1 - s_2^2 \sin^2 \omega_2) + \\ + 2 s_1 s_2 (\cos \omega_1 \cos \omega_2 + c_1 c_2 \sin \omega_1 \sin \omega_2). \end{aligned}$$

Возможна ситуация, когда быстрее изменяются направления перигентров. Напомним, что перигей орбиты Луны движется существенно быстрее узла. Поэтому разумно ввести 4-мерное фактор-пространство \mathbb{H}_4 , элементом которого является класс орбит с фиксированными p, e, i, Ω и всевозможными значениями ω . В фактор-пространстве \mathbb{H}_4 введем расстояние

$$\varrho_4 = \min_{\omega_1, \omega_2} \varrho_2. \quad (12)$$

Согласно [8] оно дается формулой (6) при

$$\xi_4 = e_1 e_2 + \cos I. \quad (13)$$

Можно идти и дальше, игнорируя и узлы, и перигентры. Достаточно ввести трехмерное фактор-пространство \mathbb{H}_5 , элементом которого является класс орбит с фиксированными p, e, i и всевозможными значениями Ω, ω . В фактор-пространстве \mathbb{H}_5 введем расстояние

$$\varrho_5 = \min_{\Omega_1, \Omega_2, \omega_1, \omega_2} \varrho_2. \quad (14)$$

Согласно [8] оно дается формулой (6) при

$$\zeta_5 = e_1 e_2 + \cos(i_1 - i_2). \quad (15)$$

Наконец, встречается ситуация, когда узлы и перицентры имеют большие вековые возмущения, тогда как остальные три элемента орбиты и долгота перицентра $\varpi = \Omega + \omega$ меняются незначительно. Полезно поэтому ввести 4-мерное фактор-пространство \mathbb{H}_6 , элементом которого является класс орбит с фиксированными p, e, i, ϖ . Долготы узлов и аргументы перицентров могут принимать произвольные значения, но сумма их фиксирована. В фактор-пространстве \mathbb{H}_6 введем расстояние

$$\varrho_6 = \min \varrho_2. \quad (16)$$

Здесь минимум берется по $\Omega_1, \Omega_2, \omega_1, \omega_2$ при условиях

$$\Omega_1 + \omega_1 = \varpi_1, \quad \Omega_2 + \omega_2 = \varpi_2,$$

где ϖ_1, ϖ_2 фиксированы. Как всегда, ϱ_6 дается формулой (6). Однако в отличие от всех разобранных случаев элементарной формулы для ζ_6 не существует. Приведем алгоритм расчета ζ_6 [17]:

1. Если хотя бы одна из орбит круговая, то

$$\zeta_6 = \cos(i_1 - i_2).$$

2. Пусть хотя бы одна из орбит (дадим ей номер 2) лежит в основной плоскости и описывает прямое движение, так что $s_2 = 0$, $c_2 = 1$. Тогда

$$\zeta_6 = c_1 + \frac{1}{2}(1 - c_1)e_1 e_2 + \frac{1}{2}(1 + c_1)e_1 e_2 \cos \varpi.$$

3. Пусть хотя бы одна из орбит (дадим ей номер 2) лежит в основной плоскости и описывает обратное движение, так что $s_2 = 0$, $c_2 = -1$. Тогда

$$\zeta_6 = -c_1 + e_1 e_2.$$

4. Пусть $e_1 e_2 s_1 s_2 \neq 0$,

$$i_1 = i_2, \quad \sin \varpi = 0, \quad (17)$$

где $\varpi = \varpi_1 - \varpi_2$.

- а) При $\mu = 1$ и $\mu = -1$ находим все вещественные корни $y_n(\mu)$ уравнения

$$\begin{aligned} &[(1+c_1)(2+\mu e_1 e_2) \cos \varpi + e_1 e_2(1+c_1)+ \\ &+ 2e_1 e_2(1-c_1) \cos \varpi \cos y] \sin y = 0 \end{aligned} \quad (18)$$

на дуге $-\pi < y \leq \pi$. Два из них, $y = 0$ и $y = \pi$, тривиальны и не зависят от μ . Всего получаем не более шести различных чисел $y_n(\mu)$.

- б) По формуле

$$\begin{aligned} \zeta_2(x, y) = & A_0 + A_1 \cos(\varpi - y) + A_2 \cos y - A_2 \cos x + \\ & + B_1 \cos(\varpi - x - y) + B_2 \cos(\varpi - 2y) + B_3 \cos \varpi + B_4 \cos(\varpi + x - y) \end{aligned} \quad (19)$$

находим $\zeta_2(x(\mu), y_n(\mu))$, где $x(\mu)$ дается соотношениями $\cos x = \mu$, $\sin x = 0$. Коэффициенты тригонометрического многочлена (19) равны

$$A_0 = c_1 c_2, \quad A_1 = s_1 s_2, \quad 2A_2 = e_1 e_2 s_1 s_2,$$

$$4B_1 = e_1 e_2(1 - c_1)(1 + c_2),$$

$$4B_2 = e_1 e_2(1 - c_1)(1 - c_2),$$

$$4B_3 = e_1 e_2(1 + c_1)(1 + c_2),$$

$$4B_4 = e_1 e_2(1 + c_1)(1 - c_2).$$

- с) Искомая величина ζ_6 равна наибольшему из чисел $\zeta_2(x(\mu), y_n(\mu))$.

5. Пусть $e_1 e_2 s_1 s_2 \neq 0$ и хотя бы одно из условий (17) нарушено (случай общего положения).

- а) При $\mu = 1$ и $\mu = -1$ находим все вещественные корни $y_n(\mu)$ уравнения

$$b_0 + b_1 \cos y + b_2 \sin y + b_3 \cos 2y + b_4 \sin 2y + b_5 \cos 3y + b_6 \sin 3y = 0.$$

Здесь

$$\begin{aligned}
b_0 &= e_1 e_2 s_1^2 s_2^2 \sin \varpi, \\
b_1 &= 2s_1 s_2 (1 - c_1 c_2) (2 + \mu e_1 e_2) \sin \varpi, \\
b_2 &= -s_1 s_2 [e_1 e_2 (1 + c_1 + c_2 - 3c_1 c_2) + \\
&\quad + 2(1 - c_1 c_2) (2 + \mu e_1 e_2) \cos \varpi], \\
b_3 &= (1 - c_1) (1 - c_2) [e_1 e_2 (1 - c_1 - c_2 - 3c_1 c_2) \sin \varpi - \\
&\quad - (1 + c_1) (1 + c_2) (2 + \mu e_1 e_2) \sin 2\varpi], \\
b_4 &= (1 - c_1) (1 - c_2) [-e_1 e_2 (1 - c_1 - c_2 - 3c_1 c_2) \cos \varpi + \\
&\quad + (1 + c_1) (1 + c_2) (2 + \mu e_1 e_2) \cos 2\varpi], \\
b_5 &= -e_1 e_2 s_1 s_2 (1 - c_1) (1 - c_2) \sin 2\varpi, \\
b_6 &= e_1 e_2 s_1 s_2 (1 - c_1) (1 - c_2) \cos 2\varpi.
\end{aligned}$$

При каждом μ корней $y_n(\mu)$ не более 6.

- b) Каждому корню $y_n(\mu)$ отвечает ровно одно значение $x_n(\mu)$, вычисляемое по формулам

$$\begin{aligned}
\cos x &= \mu \frac{s_1 s_2 - (1 - c_1 c_2) \cos(y - \varpi)}{(1 - c_1 c_2) - s_1 s_2 \cos(y - \varpi)}, \\
\sin x &= \mu \frac{(c_2 - c_1) \sin(y - \varpi)}{(1 - c_1 c_2) - s_1 s_2 \cos(y - \varpi)}. \quad (20)
\end{aligned}$$

Получаем несколько (не более 12) точек вида $(x_n(\mu), y_n(\mu))$.

- c) Для каждой пары $(x_n(\mu), y_n(\mu))$ определяем ζ_2 по формуле (19).
d) Искомая величина ζ_6 равна наибольшему из чисел $\zeta_2(x_n(\mu), y_n(\mu))$.

Заключение

Функция ϱ_2 удовлетворяет всем приведенным выше аксиомам метрического пространства, что было показано при ее введении в статьях [7, 8]. Однако минимум расстояния по игнорируемым элементам фактор-пространства не всегда определяет там расстояние. Контрпримеры приведены в [7]. Там же установлено, что ϱ_5 служит расстоянием. Выполнимость аксиом расстояния для ϱ_3 , ϱ_4 доказана в [18].

Для ϱ_6 справедливость аксиом 1 и 2 устанавливается без большого труда. Вопрос же о справедливости аксиомы треугольника остается пока открытым.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант 18-12-00050).

Библиографические ссылки

1. *Southworth R., Hawkins G.* Statistics of meteor streams // *Smithson. Contrib. Astrophys.* — 1963. — Vol. 7. — P. 261–285.
2. *Drummond J. D.* On meteor/comet orbital discriminant D // *Proc. Southwest Regional Conf. Astron. Astrophys.* : 5. — Little Rock AR : P. F. Gott, P. S. Risher, Eds., 1979. — P. 83–86.
3. *Drummond J. D.* A test of comet and meteor shower associations // *Icarus.* — 1981. — Vol. 45. — P. 545–543.
4. *Jopek T. J.* Remarks on the Meteor Orbital Similarity D-Criterion // *Icarus.* — 1993. — Vol. 106, iss. 2. — P. 603–607.
5. *Jopek T. J., Froeschlé Cl.* Remarks on the Meteor Orbital Similarity D-Criterion // *Icarus.* — 1993. — Vol. 106, iss. 2. — P. 603–607.
6. *Калинин Д. А.* О критериях общности в кометных метеороидных комплексах // *Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка.* — 2013. — Т. 5. — С. 3–9.
7. *Холшевников К. В.* О метриках в пространствах кеплеровских орбит // *Физика космоса* : тр. 45-й Международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 1 — 5 февр. 2016 г. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2016. — С. 168–184.
8. *Kholshchevnikov K. V., Kokhirova G. I., Babadzhanyan P. B., Khamroev U. H.* Metrics in the space of orbits and their application to searching for celestial objects of common origin // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2016. — Vol. 462, iss. 2. — P. 2275–2283.
9. *Milanov D. V., Milanova Yu. V., Kholshchevnikov K. V.* Relaxed triangle inequality for the orbital similarity criterion by Southworth and Hawkins and its variants // *Celest. Mech. Dyn. Astr.* — 2019. — Vol. 131:5, iss. 1.
10. *Холшевников К. В.* Топология и метрика пар кеплеровских орбит // *Физика космоса* : тр. 30-й Международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 29 янв. — 2 февр. 2001 г. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2001. — С. 145–153.
11. *Холшевников К. В.* Пространства кеплеровских орбит // *Физика космоса* : тр. 35-й Международ. студ. науч. конф., Екатеринбург,

- 30 янв. — 3 февр. 2006 г. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2006. — С. 186—197.
12. *Зорич В. А.* Математический анализ. Ч. 2. — М. : Наука, 1984. — С. 640.
13. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике. — М. : Наука, 1984. — С. 831.
14. *Аллен К. У.* Справочник по математике. — М. : Мир, 1977. — С. 25.
15. *Холшевников К. В.* Даламберовские функции в небесной механике // Астрон. журн. — 1997. — Т. 74, вып. 1. — С. 146—153.
16. *Хаусдорф Ф.* Теория множеств. — М. : КомКнига, 2006. — С. 304.
17. *Холшевников К. В., Щепалова А. С., Джазмати М. С.* Об одном фактор-пространстве кеплеровых орбит // Вестн. С.-Петербург. ун-та. — 2020. — Т. 7(65), вып. 1. — С. 165—174.
18. *Milanov D. V.* Metrics in Keplerian orbits quotient spaces // Celest. Mech. Dyn. Astr. — 2018. — Vol. 130, iss. 3. — P. 75—94.

ОБ УНИВЕРСАЛЬНОМ БАЗОВОМ РАСПРЕДЕЛЕНИИ, ОПИСЫВАЮЩЕМ НАЧАЛЬНУЮ ФУНКЦИЮ МАСС РАЗЛИЧНЫХ АСТРОНОМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Б. М. Шустов

Институт астрономии РАН

Рассмотрены фундаментальные предпосылки существования универсального базового распределения, описывающего начальную функцию масс (НФМ) различных астрономических объектов на масштабах от пылинок до скоплений галактик. Базовое распределение имеет вид $dN \propto M^{-2} dM$, где M — масса объекта и N — количество объектов данной массы. Показано, что по крайней мере для объектов, образующихся в результате фрагментации (звезды, звездные скопления, фрагменты тел, разрушенных взрывом), в основе распределения может лежать модель белого шума. Показатель наклона -2 отражает статистические свойства белого шума и является следствием того, что во множестве конкурирующих процессов (образования объектов) нет выделенного масштаба, точнее, нет фактора, обуславливающего существование выделенного масштаба. На последующих этапах эволюции ансамбля тел могут доминировать те или иные факторы, и тогда можно говорить об определенной «физике процесса», вызывающей отклонения от базового распределения. Так, для объектов, сформировавшихся в результате (длительного) процесса слипания (аккумуляции), спектр масс (уже не являющийся НФМ!) имеет вид, приближающийся к $dN \propto M^{-3/2} dM$.

В этом контексте обсуждается классическая проблема формирования НФМ звезд, в том числе связь функции масс протозвездных облаков и НФМ звезд, а также функции масс звездных скоплений, галактик и скоплений галактик. Также обсуждаются конкретные примеры отклонения от базового вида спектра и факторы, доминирующие при образовании и дальнейшей эволюции различных населений малых тел, — от космической пыли и космического мусора до астероидов.

ON THE UNIVERSAL BASIC DISTRIBUTION DESCRIBING THE INITIAL MASS FUNCTION OF VARIOUS ASTRONOMICAL OBJECTS

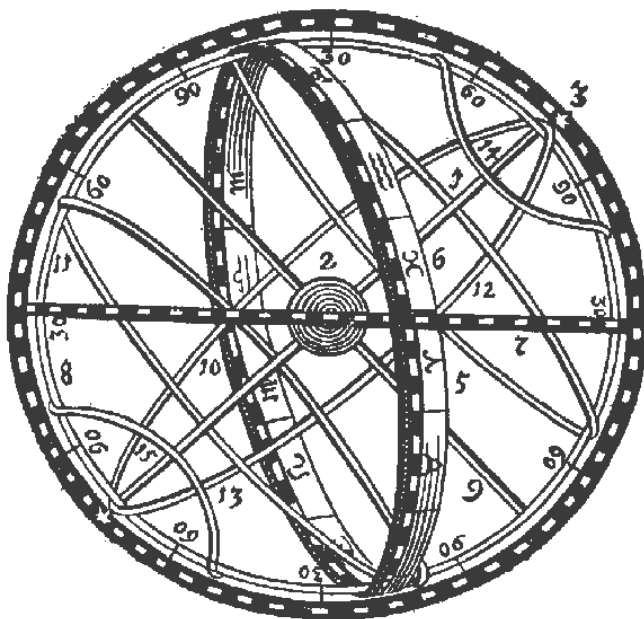
B. M. Shustov

Institute of Astronomy RAS

The fundamental prerequisites for the existence of a universal basic distribution describing the initial mass function (IMF) of various astronomical objects on scales ranging from dust particles to galaxy clusters are considered. The basic distribution is $dN \propto M^{-2} dM$, where M is the mass of the object and N is the number of objects of this mass. It is shown that at least for objects formed as a result of fragmentation (stars, star clusters, fragments of bodies destroyed by an explosion), the distribution can be based on the white noise model. The slope index -2 reflects the statistical properties of white noise and is a consequence of the fact that in a variety of competing processes (of the formation of objects) there is no dedicated scale, or rather there is no factor that determines the existence of a dedicated scale. At the subsequent stages of the evolution of an ensemble of bodies, certain factors can dominate, and then we can talk about a certain “physics of the process” that causes deviations from the basic distribution. Thus, for objects formed as a result of the (long-term) process of adhesion (accumulation), the mass spectrum (no longer IMF!) has the form approaching $dN \propto M^{-3/2} dM$.

In this context, we discuss the classical problem of formation of the IMF of stars, including the relationship between the mass function of protostellar clouds and IMF of stars, as well as the mass function of star clusters, galaxies and galaxy clusters. Specific examples of deviations from the basic type of spectrum and the factors dominating the formation and further evolution of various populations of minor bodies, from space dust and space debris to asteroids, are also discussed.

Студенческие доклады



ФОТОМЕТРИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЕРХНОВОЙ ЗВЕЗДЫ IIb ТИПА SN 2017gpn

**Е. А. Балакина^{1,2}, М. В. Пружинская^{2,4}, А. С. Москвитин³,
С. И. Блинников^{2,4,5,6}**

¹*Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,*

²*Государственный астрономический институт*

*им. П. К. Штернберга, МГУ, ³Специальная астрофизическая
обсерватория РАН, ⁴Институт космических исследований РАН,*

⁵*Институт теоретической и экспериментальной физики
им. А. И. Алиханова Национального исследовательского центра
«Курчатовский институт», ⁶Kavli IPMU, University of Tokyo*

Были выполнены наблюдения SN 2017gpn с помощью ПЗС-фотометра телескопа Цейсс-1000 (САО РАН) и проведена фотометрия 20 эпох наблюдений. На основе фотометрических данных были построены кривые блеска SN 2017gpn в *B*- и *R*-фильтрах. С помощью радиационного гидродинамического кода STELLA было проведено моделирование двухцветной кривой блеска и определены параметры пред-сверхновой звезды. Также мы изучили вопрос исключительного положения SN 2017gpn относительно центра родительской галактики NGC 1343.

PHOTOMETRY AND MODELING OF TYPE IIb SUPERNOVA 2017gpn

**Е. А. Balakina^{1,2}, М. V. Pruzhinskaya^{2,4}, А. S. Moskvitin³,
S. I. Blinnikov^{2,4,5,6}**

¹*Moscow State University, ²Sternberg Astronomical Institute MSU,*

³*Special Astrophysical Observatory RAS, ⁴Space Research Institute,*

⁵*NRC Kurchatov institute — ITEP, ⁶Kavli IPMU, University of Tokyo*

Observations of SN 2017gpn were performed using a CCD photometer of the Zeiss-1000 telescope (SAO RAS). In this work we present the photometry of 20 epochs of those observations. Based on the photometric data, the light curves of SN 2017gpn in *B* and *R* filters were obtained. The multicolor light curves were modeled numerically using the one-dimensional radiation hydrodynamical code STELLA. The question that SN 2017gpn lies well outside the host galaxy (NGC 1343) disk was discussed.

В работе были получены 20 эпох наблюдений СН 2017grn на телескопе Цейсс-1000 САО РАН. Начальная обработка изображений производилась при помощи программного обеспечения ESO-MIDAS.

С помощью карт поглощения Шлафля и Финкбайнера полученные звездные величины были исправлены за поглощение в Млечном Пути: для B -фильтра оно составляет 1.242^m , для фильтра R — 0.743^m . По результатам фотометрии были построены кривые блеска в двух фильтрах.

Следующим шагом было моделирование кривых блеска при помощи радиационного гидродинамического кода STELLA. Параметры основной модели представлены в таблице. Изучив результаты гидродинамических моделирований других СН Ib, мы обнаружили, что все параметры хорошо согласуются между собой за исключением радиуса пред-СН. Поэтому была подобрана модель с большим значением радиуса: $R = 400 R_\odot$ и ^{56}Ni , сосредоточенным в ядре, которая хорошо описывает наблюдательные данные. Выбор в пользу основной модели был сделан на основе данных о фотосферных скоростях.

Основные параметры моделей для СН 2017grn, полученные при помощи кода STELLA

Параметр	Основная модель	Дополнительная модель
Масса пред-СН	$3.5 M_\odot$	$3.5 M_\odot$
Радиус пред-СН	$50 R_\odot$	$400 R_\odot$
Масса водородной оболочки	$0.06 M_\odot$	$0.21 M_\odot$
Масса компактного остатка	$1.41 M_\odot$	$1.41 M_\odot$
Количество ^{56}Ni	$0.11 M_\odot$, перемешан	$0.11 M_\odot$, в центре
Энергия взрыва	1.2×10^{51} эрг	1.2×10^{51} эрг

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 18-12-00522, а также программы развития МГУ «Выдающиеся научные школы МГУ: Физика звезд, релятивистских компактных объектов и галактик».

СПЕКТРАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА ОБЛАСТЕЙ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ ГАЛАКТИКИ DDO 53

К. И. Васильев, А. Д. Яровава, О. В. Егоров

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова

Прошлые исследования показали наличие зон повышенной дисперсии скоростей в областях звездообразования близкой карликовой галактики DDO 53, природа которых не ясна. В настоящей работе была проведена оценка роли ударных волн в ионизации газа в галактике на основе данных, полученных на 6-м телескопе БТА при помощи SCORPIO-2 в режиме длиннощелевой спектроскопии. Мы не выявили уверенных признаков ударного возбуждения, однако показываем, что ударные волны и фотоионизация могут порождать сравнимые отношения интенсивностей эмиссионных линий в условиях низкой металличности, как в DDO 53. Обнаружены два звездоподобных объекта с широкими профилями Бальмеровских линий, требующие дополнительного изучения.

SPECTRAL DIAGNOSTICS OF STAR-FORMING REGIONS IN THE GALAXY DDO 53

K. I. Vasilyev, A. D. Yarovova, O. V. Egorov

Lomonosov Moscow State University

The previous studies have revealed areas of high velocity dispersion in star-forming regions of DDO 53, which origin is not well established. In this work we evaluate a role of the shock waves in the gas ionization in the galaxy based on the data obtained at the 6-m BTA telescope with long-slit spectrograph of SCORPIO-2. We did not find any confident signs of shock excitation, however we show that shock waves and photoionization provide comparable ratios of emission line intensities in low-metallicity medium, as in DDO 53. We detected two stellar-like objects showing broad Balmer line profiles, which require additional studies.

DDO 53 — близкая карликовая галактика с активным звездообразованием из группы М 81. Ранее в работе [1] при помощи панорамной спектроскопии были выделены три протяженные области с

повышенной дисперсией скоростей ионизованного газа. Высокоскоростные движения в них могут быть связаны с расширением газовых оболочек под действием давления излучения и звездного ветра, а также с распространением ударных волн. Для определения роли этих процессов в возбуждении атомов межзвездной среды широко используются диагностические диаграммы $[\text{OIII}]/\text{H}\beta$ vs $[\text{NII}]/\text{H}\alpha$ и $[\text{OIII}]/\text{H}\beta$ vs $[\text{SII}]/\text{H}\alpha$ (так называемые BPT-диаграммы).

В настоящей работе были использованы данные длиннощелевой спектроскопии, а также узкополосные снимки галактики в линиях $\text{H}\alpha$, $[\text{SII}]$, полученные на 6-м телескопе БТА с прибором SCORPIO-2. По спектральным данным были построены BPT-диаграммы и определены параметры межзвездной среды (температура, плотность, металличность). На основе узкополосных снимков была построена карта чувствительного к наличию ударных волн отношения $[\text{SII}]$ к $\text{H}\alpha$.

Полученные данные не показывают явных признаков ударного возбуждения в излучении галактики. Однако широко используемые критерии, отделяющие области фотоионизации от областей с существенным вкладом ударных волн, чувствительны к металличности. Модели MAPPINGS III [2] для ударных волн в межзвездной среде показывают сильный сдвиг в сторону низких значений $[\text{NII}]/\text{H}\alpha$ и $[\text{SII}]/\text{H}\alpha$ при низкой металличности. Определенная нами металличность для DDO 53 ($0.08 Z_{\odot}$) существенно ниже минимальных значений, используемых в MAPPINGS III ($0.22 Z_{\odot}$), однако экстраполяция сдвига на BPT-диаграммах показывает, что ударные волны и фотоионизация могут приводить к сравнимым отношениям потоков в эмиссионных линиях в DDO 53.

Обнаружены два звездоподобных объекта со спектрами, типичными для HII-областей, но с широкими профилями Бальмеровских линий, причем условия возбуждения газа в них различны. Требуется дальнейшие исследования для выяснения их природы.

Работа выполнена при поддержке гранта Программы развития МГУ «Ведущая научная школа “Физика звезд, релятивистских объектов и галактик”» и гранта РФФИ №18-02-00976.

Библиографические ссылки

1. *Moiseev A. V., Lozinskaya T. A.* Ionized gas velocity dispersion in nearby dwarf galaxies: looking at supersonic turbulent motions // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2012. — Vol. 423. — P. 1831–1844. 1203.6213.
2. *Allen Mark G., Groves Brent A., Dopita Michael A. et al.* The MAPPINGS III Library of Fast Radiative Shock Models // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* — 2008. — Vol. 178, № 1. — P. 20–55. 0805.0204.

ИССЛЕДОВАНИЕ МОЛОДОГО ЗВЕЗДНОГО ОБЪЕКТА TH 28

Н. С. Дмитриенко¹, П. Э. Боли¹, С. Ю. Мельников²

¹*Московский физико-технический институт,*

²*Национальный университет Узбекистана*

Исследован молодой звездный объект Th 28 (V1190 Sco), относящийся к классу Т Тельца. Представлен анализ наблюдений в ближнем инфракрасном диапазоне с использованием спектрографа интегрального поля SINFONI телескопа VLT Европейской южной обсерватории.

INVESTIGATIONS OF THE YOUNG STELLAR OBJECT TH 28

N. S. Dmitrienko¹, P. A. Boley¹, S. Y. Melnikov²

¹*Moscow Institute of Physics and Technology,*

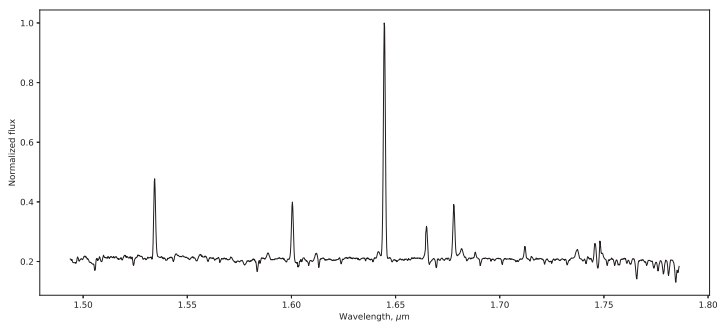
²*National University of Uzbekistan*

This work explores the young stellar object Th 28 (V1190 Sco), which belongs to the class T Tauri. The analysis of observations in the near infrared range using the SINFONI integral field spectrograph of the European Southern Observatory VLT telescope is presented.

В работе исследуется молодой звездный объект Th 28 (V1190 Sco), который относится к классу Т Тельца. Представлен анализ наблюдений в ближнем инфракрасном диапазоне (J, H, K; 1.1–2.45 мкм) с использованием спектрографа интегрального поля SINFONI телескопа VLT Европейской южной обсерватории с пространственным разрешением 0.1".

Центральный источник области виден во многих линиях излучения (H₂, [Fe II] (см. рисунок), Pa α , Br γ и др.). Помимо этого просматривается структура асимметричного джета (в частности, в линиях [Fe II]) и аккреционного диска (в основном в линиях молекулярного водорода H₂). Работа посвящена изучению морфологии джета, а также оценке физических параметров, таких как лучевая скорость, столбцовая плотность и температура возбуждения линий H₂. В совокупности с предыдущими исследованиями новые данные позволяют

дополнить информацию о физических условиях и процессах, происходящих в данной области звездообразования.



Линии эмиссии [Fe II] в спектре Th 28

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 18-72-10132.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ РАКЕТНЫХ СОПЕЛ

Г. С. Жуклевич

Уральский федеральный университет

Вопрос массы той или иной детали наиболее остро стоит в ракетно-космической отрасли. Науке известно, что максимально эффективно сопло, у которого отношение входного отверстия к выходному максимально, но в таком случае и масса стремительно увеличивается! Встает простой и закономерный вопрос: как получить максимальный удельный импульс двигателя при минимальной массе сопла?

В работе представлен программный комплекс, который решает следующий спектр задач: построение сопла методом характеристик, пролив сопла с помощью различных методов вычислительной гидродинамики, решение уравнения Эйлера в области течения газа, моделирование процессов в камере сгорания с учетом модели реального газа. Реализован ряд базовых методов для моделирования поведения клиновоздушных ракетных двигателей.

APPLICATION OF METHODS OF COMPUTATIONAL HYDRODYNAMICS FOR OPTIMIZATION OF ROCKET NOZZLES

G. S. Zhuklevich

Ural Federal University

The question of the mass of a particular detail is most acute in the rocket and space industry. Science knows that the most efficient nozzle is one in which the ratio of the inlet to the outlet is maximum, but in this case the mass increases rapidly! There is a simple question — how to get the maximum specific momentum from the engine with a minimal mass of the nozzle?

The paper presents a software package that solves the following range of problems: method of characteristics for nozzle optimization, simulating fluid flow inside a nozzle using various methods of computational fluid dynamics, solving the Euler equation in the gas flow region, simulating processes in the combustion chamber. Basics methods to compute aerospike engine were written.

Для решения нескольких задач, связанных с проектированием и испытанием ракетных двигателей, был создан программный комплекс NODE. Модуль для моделирования поведения жидкости рассчитан на работу с соплами и камерой сгорания. Задача решена двумя методами — методом конечных разностей и методом граничных элементов. Также реализован метод характеристик для оптимизации ракетного сопла. По возможности учитывалось поведение реального газа, например, в расчете давления в камере сгорания. Более того, создана база для работы с клиновоздушными ракетными двигателями.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ ЧИСЛЕННОГО ИНТЕГРИРОВАНИЯ ДЛЯ БОРТОВОЙ МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА СИСТЕМЫ ГЛОНАСС

И. С. Загоруйко

*Национальный исследовательский
Томский государственный университет*

Произведено исследование трех методов численного интегрирования (Эверхарта, Адамса—Мультона—Бошфорта и коллокационно-го). В качестве параметра оценки производительности использовалось количество обращений к функции правых частей. Оценка точности получаемого решения происходила путем сравнения получаемого решения с эталонным.

RESEARCH OF EFFICIENCY OF NUMERICAL INTEGRATION METHODS FOR ON-BOARD MODEL OF MOTION TO GLONASS SYSTEM

I. S. Zagoruyko

National Research Tomsk State University

Three integrators (Everhart, Adams—Multon—Boschfort and collocation) for the orbital motion of the GLONASS spacecraft were investigated. The number of calls to the function of the right-hand sides was used as a parameter for evaluating performance. The accuracy of the obtained solution was evaluated by comparing the obtained solution with the reference one.

Целью работы является выбор эффективного метода численного интегрирования для использования его в бортовой модели движения космического аппарата (КА) системы ГЛОНАСС.

Космические аппараты системы ГЛОНАСС движутся по почти круговым орбитам под влиянием несферичности потенциала Земли и притяжения внешних тел — Луны и Солнца. При отсутствии управления в орбитальной динамике этих объектов наблюдается незначительный рост эксцентриситета орбиты, поскольку они захвачены [1]

в устойчивый резонанс Лидова—Козаи. Движение объектов является регулярным на значительных интервалах времени [1].

В работе рассматриваются три метода численного интегрирования [2]: метод Адамса—Мультона—Бошфорта (МAMB), метод Эверхарта (МЭ) и коллокационный метод (КМ).

Численный метод, используемый в бортовых алгоритмах, должен сочетать в себе два свойства: быстродействие и точность получаемого решения. Поэтому для решения задачи численного интегрирования уравнений движения КА системы ГЛОНАСС было проведено исследование, в котором были выявлены зависимость точности получаемого решения от порядка используемого метода и требуемой локальной точности, зависимость количества обращений к функции правых частей также от порядка метода и локальной точности.

Полученные результаты показывают, что МЭ и КМ близки по точности получаемого решения и быстродействию. Это объясняется тем, что МЭ является частным случаем КМ, имея особую схему реализации; МAMB превосходит МЭ и КМ по производительности, но имеет более низкую точность получаемого решения при равнозначной требуемой локальной точности для этих методов. Этот недостаток МAMB можно обойти, повысив локальную точность. Количество обращений к функции правых частей при этом возрастет, но метод будет сравним по точности решения с МЭ и КМ.

Библиографические ссылки

1. *Томилова И. В., Бордовицына Т. В.* Особенности структуры резонансных возмущений неуправляемых объектов навигационных систем ГЛОНАСС и GPS и их влияние на орбитальную эволюцию объектов // Изв. вузов Физика. — 2017. — Т. 60, № 4. — С. 119—125.
2. *Авдюшев В. А.* Численное моделирование орбит небесных тел. — Томск : Издат. дом. ТГУ, 2015. — 335 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ НОВЫХ ПРОТЯЖЕННЫХ КОНУСОВ ИОНИЗАЦИИ В ГАЛАКТИКАХ

Д. В. Козлова^{1,2}, А. В. Моисеев²

¹Уральский федеральный университет, ²Специальная
астрофизическая обсерватория Российской академии наук

Данная работа является частью международного проекта по поиску и исследованию облаков ионизованного газа вокруг галактик с активными ядрами. Представлены результаты длиннощелевой спектроскопии нескольких галактик-кандидатов. Исследованы механизмы ионизации газа, приведшие к образованию наблюдаемых эмиссионных областей.

STUDY OF THE NEW EXTENDED IONIZATION CONES IN GALAXIES

D. V. Kozlova^{1,2}, A. V. Moiseev²

¹Ural Federal University, ²Special Astrophysical Observatory of the
Russian Academy of Sciences

This work is a part of the large international project to search and study of ionized gas clouds around galaxies with the active nuclei (AGN). We present the follow-up long-slit spectroscopy of several candidate galaxies. Mechanisms that could create the observed emission clouds are investigated.

Данная работа является частью международного проекта по поиску и исследованию облаков ионизованного газа вокруг галактик с активными ядрами. Основные цели проекта: измерение изменений светимости центральной машины активных ядер на шкалах до сотен тысяч лет (что соответствует времени пересечения облаков со скоростью света), оценка углового раствора конуса ионизирующего излучения, а также выяснение природы внешнего газа за пределами галактических дисков. Вначале волонтерами проекта Galaxy Zoo были выделены галактики, в которых на снимках в широких фильтрах в обзорах SDSS и Pan-STARRS было заподозрено наличие облаков газа, излучающего в запрещенных эмиссионных линиях. Мы представляем результаты длиннощелевой спектроскопии нескольких из

выбранных кандидатов, выполненной в первичном фокусе 6-м телескопа САО РАН с использованием фокального редуктора SCORPIO. По этим данным мы исследуем механизмы ионизации газа, которые привели к образованию наблюдаемых эмиссионных областей.

ВЛИЯНИЕ КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАССЫ НА МАГНИТОСФЕРЫ ГОРЯЧИХ ЮПИТЕРОВ

Е. А. Колымагина^{1,2}

¹*Институт астрономии Российской академии наук, ²Московский
физико-технический институт (Национальный
исследовательский университет)*

Работа представляет результаты трехмерного численного газодинамического моделирования течения вещества в атмосфере горячего юпитера HD 209458 b при взаимодействии с корональными выбросами масс различных конфигураций. Учтено влияние магнитного поля двойной системы.

THE INFLUENCE OF CORONAL MASS EJECTIONS ON MAGNETOSPHERES OF HOT JUPITERS

Е. А. Kolymagina^{1,2}

¹*Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences, ²Moscow
Institute of Physics and Technology*

The paper presents the results of 3-dimensional numerical gas-dynamical modeling of matter flows in the atmosphere of hot Jupiter HD 209458 b due to its interaction with coronal mass ejections of different configurations. The influence of the binary system magnetic field is considered.

Значительную часть открытых на сегодняшний день экзопланет составляют горячие юпитеры — планеты, находящиеся на близком расстоянии от родительской звезды и обладающие массой порядка массы Юпитера. Значительная часть горячих юпитеров заполняет свою полость Роша, что может приводить к истечению вещества через внутреннюю точку Лагранжа L_1 . Ранее авторами были проведены расчеты, показывающие, что оболочка горячего юпитера может быть квазистационарной благодаря динамическому давлению звездного ветра [1], а также оценка влияния КВМ различных конфигураций на эволюцию течений и темп потери массы планетой [2, 3]. При этом вычисления проводились без учета ионизации газа в атмосфере и, следовательно, без учета взаимодействия вещества с магнитным полем системы. В настоящем докладе представлены результаты

трехмерного магнитогазодинамического моделирования течения однократно ионизированного вещества в атмосфере HD 209458 b при учете взаимодействия с КВМ родительской звезды.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-02-00178 «Исследование влияния вспышечной активности родительской звезды на газодинамику атмосфер экзопланет» и с использованием вычислительных ресурсов ОВК НИЦ «Курчатовский институт», <http://computing.nrcki.ru/>.

Библиографические ссылки

1. *Bisikalo D. V., Kaigorodov P. V., Ionov D. E., Shematovich V. I.* Types of gaseous envelopes of «hot Jupiter» exoplanets // *Astron. Rep.* — 2013. — Vol. 57. — P. 715—725.
2. *Cherenkov A., Bisikalo D., Fossati L., Möstl C.* The Influence of Coronal Mass Ejections on the Mass-loss Rates of Hot-Jupiters // *Astrophys. J.* — 2017. — Vol. 846.
3. *Kaigorodov P. V., Ilyina E. A., Bisikalo D. V.* Interaction of the Extended Envelope of a Hot Jupiter with a Narrow Coronal Mass Ejection // *Astron. Rep.* — 2019. — Vol. 63. — P. 365—371.

ГДЕ РОЖДАЕТСЯ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЕ В АКТИВНЫХ ГАЛАКТИКАХ?

И. Г. Крамаренко

*Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)*

Исследована временная задержка между спектральной плотностью потока радиоизлучения гамма-ярких джетов на 15 ГГц и гамма-потоком в диапазоне 0.1—300 ГэВ. Сделан вывод о том, что гамма-излучение рождается в зоне центра активных галактик размером менее нескольких парсек.

WHERE DOES GAMMA-RAY EMISSION IN ACTIVE GALACTIC NUCLEI COME FROM?

I. G. Kramarenko

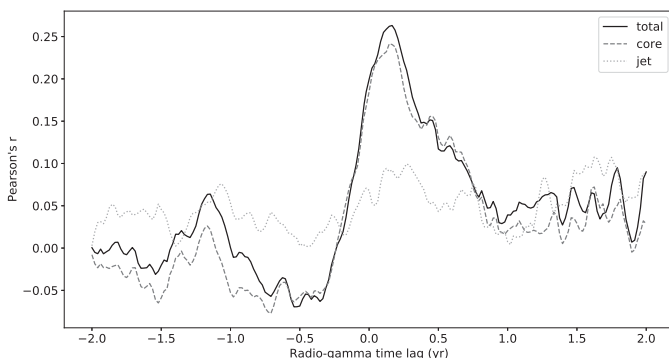
*Moscow Institute of Physics and Technology
(National Research University)*

A time delay between flux density of radio emission of gamma-ray bright jets at 15 GHz and 0.1—300 GeV photon flux was investigated. A conclusion is made that the dominant gamma-ray emission region is typically located within several parsecs from the central nucleus.

Теоретическая модель джета предсказывает, что оптическая толщина релятивистской струи, вырывающейся из центра активной галактики, убывает с ростом частоты, и, как следствие, гамма-излучение опережает излучение в радиодиапазоне [1, 2]. По данным, полученным радиоинтерферометром VLBA и космическим гамма-телескопом Fermi, искалась характерная задержка между спектральной плотностью потока радиоизлучения на 15 ГГц и гамма-потоком в диапазоне 0.1—300 ГэВ.

Кривые блеска активных галактик в гамма-диапазоне с недельным усреднением были представлены в виде байесовских блоков. Затем между радио- и гамма-данными, сдвинутыми относительно друг друга на некоторый промежуток времени, рассчитывался коэффициент корреляции Пирсона. Был построен график зависимости усредненного по всем источникам коэффициента корреляции от

временной задержки (см. рисунок). Оказалось, что характерное запаздывание радиоизлучения в системе источника составляет от 1 до 2 месяцев, при этом у компонент джета, за исключением центрального ядра, корреляция не наблюдается. Это показывает, что гамма-излучение рождается на расстоянии не более нескольких парсек от центра активной галактики.



Зависимость усредненного коэффициента корреляции Пирсона от временной задержки между спектральной плотностью потока радиоизлучения на 15 ГГц (полный поток, компонента ядра и компонента джета) и гамма-поток в диапазоне 0.1–300 ГэВ в системе отсчета наблюдателя (выборка источников, проявляющих переменность)

Библиографические ссылки

1. *Pushkarev A. B., Kovalev Y. Y., Lister M. L.* Radio/Gamma-ray Time Delay in the Parsec-scale Cores of Active Galactic Nuclei // *Astrophys. J. Lett.* — 2010. — Vol. 722, № 1. — P. L7–L11. 1006.1867.
2. *Fuhrmann L., Larsson S., Chiang J. et al.* Detection of significant cm to sub-mm band radio and γ -ray correlated variability in Fermi bright blazars // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2014. — Vol. 441, № 3. — P. 1899–1909. 1403.4170.

ДИНАМИКА ПЫЛИНОК В ОБЛАСТЯХ ИОНИЗОВАННОГО ВОДОРОДА

А. В. Кузин, Д. Д. Лисицин

Московский государственный университет

Работа посвящена изучению динамики пылинок в областях ионизованного водорода около массивных звезд с целью оценки времени достижения пылинками терминальной скорости. Определены границы применимости приближения терминальной скорости в эволюционных моделях областей ионизованного водорода с учетом движения пылинок относительно газа. Для этого проводится численное интегрирование уравнения движения для пылинок различных типов, характерных для областей образования массивных звезд.

THE GRAIN DYNAMICS IN A REGION OF IONIZED HYDROGEN

A. V. Kuzin, D. D. Lisitsin

Moscow State University

We consider a grain dynamics in a region of ionized hydrogen around a massive star for estimating a time of setting a grain terminal velocity. We determine the applicability limits for the terminal velocity approximation for evolutionary models of ionized hydrogen regions that take into account a relative motion of dust and gas. For that purpose, we solve numerically the equation of motion for dust grains of several kinds typical for massive star forming regions.

Одной из характерных особенностей областей ионизованного водорода является специфическое распределение интенсивности излучения в ближнем, среднем и дальнем инфракрасных диапазонах. Различия в картах эмиссии на длинах волн от 8 до 500 мкм, вероятно, являются отражением различного пространственного распределения пылинок [1]. Для объяснения неравномерного распределения пыли в областях ионизованного водорода молодых массивных звезд используются газодинамические модели, в которых предполагается,

что пылинки движутся с терминальной скоростью [2, 3]. Это означает, что в каждой точке траектории пылинки ее скорость зависит только от локальных параметров среды, что позволяет не решать уравнение движения для каждой отдельной частицы. Однако это предположение справедливо лишь при условии, что время установления терминальной скорости существенно меньше других характерных времен задачи. Это утверждение нуждается в проверке. В работе проверяется предположение о стационарности поля скоростей пылинок. Для этого необходимо решить уравнение движения пылинок нескольких характерных типов для туманностей около молодых массивных звезд. Рассматриваются звезды спектральных классов B0—O4.

В качестве метода решения уравнения движения используется численное интегрирование. Учитываются силы гравитации, трения и давления излучения. Локальные параметры среды, необходимые для расчета этих сил, рассчитываются программой Cloudy [4]. Выясняется, за какое время пылинка начинает двигаться с терминальной скоростью. Критерием применимости модели движения пыли с терминальной скоростью будет сравнение времени достижения терминальной скорости с характерными временами движения в газодинамических моделях.

Библиографические ссылки

1. *Topchieva A. P., Wiebe D. S., Kirsanova M. S., Krushinskii V. V.* Infrared Morphology of Regions of Ionized Hydrogen // *Astronomy Reports*. — 2017. — Vol. 61, № 12. — P. 1015–1030. 1801.08204.
2. *Akimkin V. V., Kirsanova M. S., Pavlyuchenkov Ya. N., Wiebe D. S.* Dust dynamics and evolution in expanding H II regions. I. Radiative drift of neutral and charged grains // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2015. — Vol. 449, № 1. — P. 440–450. 1502.06865.
3. *Akimkin V. V., Kirsanova M. S., Pavlyuchenkov Ya. N., Wiebe D. S.* Dust dynamics and evolution in H II regions — II. Effects of dynamical coupling between dust and gas // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2017. — Vol. 469, № 1. — P. 630–638. 1705.00269.
4. *Ferland G. J., Chatzikos M., Guzmán F. et al.* The 2017 Release Cloudy // *Rev. Mex. Astron. Astrofis.* — 2017. — Vol. 53. — P. 385–438. 1705.10877.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОМПТОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ В ЗАМАГНИЧЕННОЙ РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ПЛАЗМЕ

И. Д. Маркозов

Санкт-Петербургский государственный университет

В ходе работы рассмотрено комптоновское рассеяние фотонов двух эллиптических поляризаций на электронах в плазме в сильном магнитном поле. Были выведены функции перераспределения фотонов по частоте и численно получены такие характеристики, как средний импульс фотона после рассеяния, средняя энергия, а также дисперсии данных величин. Произведено усреднение по ансамблю электронов, имеющих релятивистское распределение Максвелла вдоль поля. Промоделировано многократное рассеяние в среде и получены вышеуказанные характеристики в этом случае.

STUDY OF STATISTICAL PROPERTIES OF COMPTON SCATTERING IN A MAGNETIZED RELATIVISTIC PLASMA

I. D. Markozov

Saint-Petersburg State University

We considered Compton scattering of photons of two elliptical polarizations by electrons in plasma in a strong magnetic field. The frequency redistribution functions of the photons were derived, and characteristics such as the average photon momentum after scattering, average energy, and dispersions of these quantities were obtained numerically. These were averaged over an ensemble of electrons with a relativistic Maxwell distribution along the field. Multiple scattering in the medium was simulated and the above characteristics were obtained in this case.

При формировании спектров ярких рентгеновских пульсаров (аккрецирующих нейтронных звезд с сильными магнитными полями) комптоновское рассеяние играет важную роль. В процессе аккреции вещество звезды-компаньона захватывается нейтронной звездой, устремляется к магнитным полюсам нейтронной звезды и теряет там

энергию, высвечиваемую в основном в виде рентгеновского излучения. В замагниченной плазме излучение распадается на две эллиптические поляризации — обыкновенную и необыкновенную плазменные моды. Сечение комптоновского рассеяния сильно зависит от напряженности поля и различно для фотонов, принадлежащих разным плазменным модам. От этого, в свою очередь, зависит характер переноса излучения в атмосфере нейтронных звезд.

В ходе выполнения работы была написана программа, позволяющая считать сечения для обеих эллиптических поляризаций и вычислять средние значения импульса и энергии фотона после рассеяния вместе с дисперсиями данных величин. Мы рассматривали случай плазмы с релятивистским распределением Максвелла по импульсам вдоль поля. Вышеуказанные средние величины и их дисперсии были усреднены по ансамблю электронов в плазме, имеющей температуру порядка 1 кэВ. С помощью Монте-Карло симуляции было промоделировано многократное рассеяние — блуждание электрона в среде и получены средние с дисперсиями для этого случая. Показаны различия в вычисляемых характеристиках для фотонов, принадлежащих разным поляризациям. Также были выведены усредненные по ансамблю электронов функции перераспределения фотонов по частоте для различных поляризаций в случае сильно анизотропной индикатрисы рассеяния, определяемой рассматриваемыми сечениями в магнитной плазме. Дана качественная интерпретация наблюдаемых особенностей перераспределения фотонов по энергиям и указаны эффекты, к которым это может приводить. Результаты данной работы важны для решения задачи переноса излучения в атмосфере нейтронной звезды, численного моделирования спектров и поляризации излучения ярких рентгеновских пульсаров.

СТРУКТУРА И КИНЕМАТИКА ШИРОКИХ ОКРЕСТНОСТЕЙ РАССЕЯННОГО СКОПЛЕНИЯ АЛЬФА ПЕРСЕЯ

В. В. Никифорова, М. В. Кулеш, А. Ф. Селезнев

Уральский федеральный университет

Представлены результаты исследования широких (примерно $100 \times 100^\circ$) окрестностей рассеянного скопления Альфа Персея (Melotte 20) по данным каталога Gaia DR2. В этой области выделены две структуры. Во-первых, собственно скопление с массой примерно $900 M_\odot$ и приливным радиусом 12.8 пк (4.2°), имеющее протяженную корону с радиусом примерно 20° . Во-вторых, «поток» или «волокно» протяженностью примерно 70° . Этот поток расположен в основном несколько дальше скопления и частично перекрывается с ним. И скопление, и «поток» имеют структурные особенности, свидетельствующие об их приливном взаимодействии. Определены параметры вращения скопления. Обсуждаются различные гипотезы о происхождении «потока».

STRUCTURE AND KINEMATICS OF THE WIDE VICINITY OF THE ALPHA PERSEI OPEN CLUSTER

V. V. Nikiforova, M. V. Kulesh, A. F. Seleznev

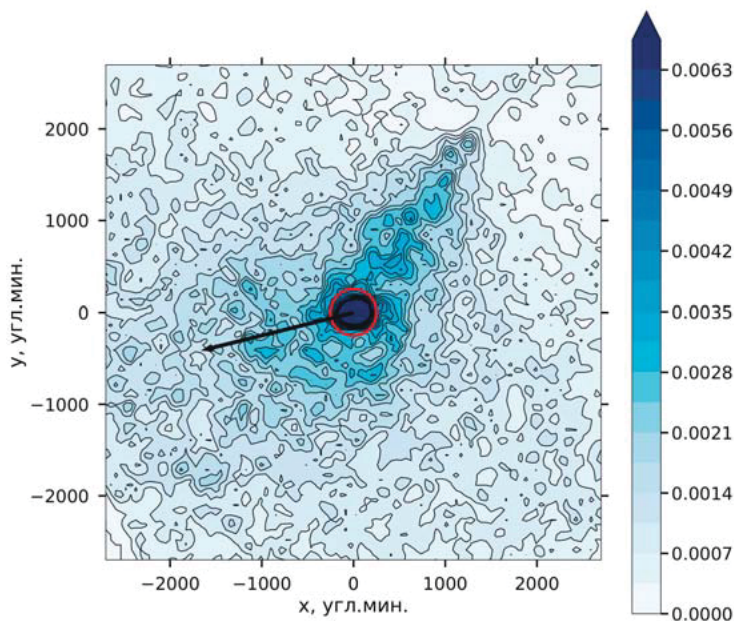
Ural Federal University

We present the results of an investigation of the wide (approximately $100 \times 100^\circ$) vicinities of the open cluster Alpha Persei (Melotte 20) by the data of the Gaia DR2 catalog. We select two structures in this region. The first one is the cluster proper with the mass of 900 solar masses approximately and the tidal radius of 12.8 parsecs (4.2°) with an extended corona with the radius of about 20° . The second one is a “stream” or the “filament” extending over 70° approximately. This “stream” is slightly farther than the cluster and overlaps with it partially. Both the cluster and the “stream” have the structural features arguing for their mutual tidal interaction. We determined the cluster rotation parameters. Different hypothesis of the “stream” origin are discussed.

В работе были исследованы различные методы выделения звезд — вероятных членов скопления. Было показано, что предположение о нормальном распределении параметров звезд фона, используемое во многих методах, не проходит проверку по критерию Колмогорова.

Карта поверхностной плотности числа звезд в исследованной области показана на рисунке. Ось x направлена в сторону возрастания галактической долготы, ось y — в сторону возрастания галактической широты. Звезды «потока» в среднем двигаются в сторону Северного полюса Галактики по отношению к звездам скопления со скоростями 8–12 км/с.

Скопление обладает протяженной короной, в которой заметны структурные детали, свидетельствующие о приливном взаимодействии. При этом наиболее вероятно, что эти детали обусловлены не влиянием Галактики, а воздействием «потока».



Карта поверхностной плотности числа звезд в окрестностях скопления Альфа Персея. Радиус красного кружка равен приливному радиусу скопления, стрелкой показано среднее движение звезд скопления, шкала справа показывает значения плотности $(\text{угл. мин})^{-2}$

ВЛИЯНИЕ МОРФОЛОГИИ РОДИТЕЛЬСКИХ ГАЛАКТИК НА СВОЙСТВА СВЕРХНОВЫХ ТИПА Ia

А. К. Новинская^{1,2}, М. В. Пружинская², Ф. Росне³,
Н. Пона³

*¹Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова, физический факультет, ²Московский
государственный университет им. М. В. Ломоносова,
Государственный астрономический институт
им. П. К. Штернберга, ³Университет им. Блеза Паскаля*

В работе определяется корреляция морфологии родительской галактики с параметрами кривых блеска сверхновых типа Ia (СН Ia). Анализ основан на данных выборки космологических СН Ia Pantheon. Подтверждено наличие зависимости параметра растяжения от морфологии родительской галактики, но с цветом никакой корреляции нет. Мы подчеркиваем необходимость учета морфологического типа родительской галактики в процедуре стандартизации сверхновых типа Ia.

THE INFLUENCE OF HOST GALAXY MORPHOLOGY ON THE PROPERTIES OF TYPE Ia SUPERNOVAE

А. К. Novinskaya^{1,2}, М. V. Pruzhinskaya², P. Rosnet³,
N. Pauna³

*¹Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, ²Lomonosov
Moscow State University, Sternberg Astronomical Institute, ³Université
Blaise Pascal*

In this work we determine the correlation between host galaxy morphology and light curve parameters of Type Ia supernovae. The analysis is based on the data from Pantheon cosmological sample of 1048 supernovae. We confirm that the stretch-parameter depends on the host morphology, but there is no any correlation for the color. We stress the importance of including the host morphology term to the standardization procedure of Type Ia supernovae.

Огромная светимость сверхновых позволяет наблюдать их даже на больших красных смещениях. Изначально считалось, что светимость СН Ia в максимуме блеска постоянна и их можно использовать

как стандартные свечи. По мере накопления наблюдательных данных удалось установить, что в максимуме блеска СН Ia имеют разную светимость, однако их можно стандартизировать. К сожалению, существующие процедуры стандартизации не позволяют полностью избавиться от дисперсии модуля расстояния на диаграмме Хаббла. Остаточный разброс может быть связан с неучтенными эффектами окружения. В связи с этим детальное изучение этих эффектов и прочих факторов, влияющих на точность измерения расстояний и определения космологических параметров, несомненно, является актуальным.

Целью данной работы являлось изучение влияния морфологического типа родительских галактик на свойства СН Ia на основе данных космологической выборки сверхновых Pantheon, содержащей 1048 объектов. С помощью известных баз данных были найдены родительские галактики сверхновых и определены их морфологические типы, а также проведено разделение сверхновых на группы в зависимости от типа галактики и исследовано влияние морфологии на свойства кривых блеска сверхновых. Кроме того, построена диаграмма Хаббла — зависимость модуля расстояния от красного смещения и посчитана дисперсия модуля расстояния для каждой группы СН Ia. Выяснилось, что наименьшую дисперсию на диаграмме Хаббла имеют сверхновые, принадлежащие неправильным галактикам.

Установлено, что параметр растяжения зависит от морфологического типа родительской галактики: большие значения характерны для неправильных и спиральных галактик, а меньшие соответственно для эллиптических и линзовидных. Наличие тренда для цвета не было установлено, хотя мы предполагаем, что сверхновые могут быть краснее в спиральных галактиках из-за наличия большого количества пыли. Эти выводы согласуются с предыдущими исследованиями, основанными на более ранних каталогах сверхновых.

Связь между морфологией родительских галактик и свойствами сверхновых типа Ia означает, что процедура стандартизации сверхновых должна быть улучшена: необходимо учитывать все параметры, влияющие на свойства сверхновой, в том числе и морфологию родительской галактики.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-72-00159) и при поддержке Программы развития МГУ «Выдающиеся научные школы МГУ: Физика звезд, релятивистских компактных объектов и галактик».

ЭФФЕКТ ЛИДОВА—КОЗАИ И КОНФИГУРАЦИОННАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ПОЧТИ КРУГОВОГО ДВИЖЕНИЯ В ОГРАНИЧЕННОЙ ЗАДАЧЕ ТРЕХ ТЕЛ

Я. И. Пантелеева

Томский государственный университет

Численно исследуется эффект Лидова—Козаи в ограниченной круговой задаче трех тел. На основании численных результатов выявлены условия проявления эффекта Лидова—Козаи, вызывающие большие возмущения в эксцентриситете и наклонении изначально круговой орбиты внутреннего тела.

LIDOV—KOZAI EFFECT AND CONFIGURATION STABILITY OF ALMOST CIRCULAR MOTION IN RESTRICTED THREE BODY PROBLEM

Ya. I. Panteleeva

Tomsk State University

The Lidov—Kozai effect in the restricted circular three-body problem is numerically investigated. Based on numerical results, the conditions are revealed for the appearance of the Lidov—Kozai effect, which causes huge perturbations in the eccentricity and inclination of the initially circular orbit of the inner body.

Рассматривается вопрос о сохранении конфигураций почти круговых орбит в ограниченной задаче трех тел. Конфигурационная устойчивость исследуется численно в зависимости от значения гравитационного параметра внешнего тела μ_P , отношения больших полуосей внешнего и внутреннего тел a_P , а также начального угла между их орбитальными плоскостями ψ_P . Считается, что орбита внутреннего тела конфигурационно устойчива, если ее эксцентриситет не превышает значения 0.2 на длительном интервале времени (10^4 оборотов).

Параметры, определяющие гравитационное воздействие внешнего тела, варьировались в пределах

$$\mu_P \in [1/1024, 64], a_P \in [2, 16], \psi_P \in [0, 180^\circ]. \quad (1)$$

Такие обширные диапазоны параметрических значений выбирались с тем, чтобы охватить широкий спектр задач динамической астрономии — от спутниковой орбитальной динамики до звездной, где доминирующее возмущающее влияние на внутреннее тело оказывает массивное внешнее.

Как показывают численные результаты, при умеренном гравитационном воздействии внешнего тела конфигурационная неустойчивость орбитального движения внутреннего тела вызывается главным образом механизмом Лидова—Козаи [1, 2], который обнаруживается, когда $39.2^\circ < \psi_P < 140.8^\circ$, а период Козаи меньше 10^4 оборотов. Если период больше 10^5 оборотов (слабое гравитационное воздействие), орбитальное движение конфигурационно устойчиво для любых наклонений ψ_P и эффект Лидова—Козаи не проявляется. При сильном гравитационном воздействии, когда период Козаи меньше 125 оборотов, эффект Лидова—Козаи не успевает развиваться, поскольку притяжение внешнего тела приводит к немедленному выбросу внутреннего тела из орбитальной системы.

Библиографические ссылки

1. *Лидов М. Л.* Эволюция орбит искусственных спутников под воздействием гравитационных возмущений внешних тел // Искусственные спутники Земли. — 1961. — Т. 8. — С. 5—45.
2. *Kozai Y.* Secular perturbations of asteroids with high inclination and eccentricity // *Astron. J.* — 1962. — Vol. 67. — P. 591—598.

ФРАКЦИОНИРОВАНИЕ ДЕЙТЕРИЯ В ДОЗВЕЗДНЫХ ЯДРАХ В ОБЛАСТИ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ ρ ЗМЕЕНОСЦА

И. В. Петрашкевич¹, А. Ф. Пунанова²

¹Уральский федеральный университет,

²Лаборатория астрохимии и внеземной физики УрФУ

В работе рассматривается фракционирование дейтерия в плотных ядрах в области звездообразования ρ Змееносца. Фракционирование дейтерия является результатом химических реакций, протекающих в условиях плотных холодных ядер. Для исследования используются наблюдения двух линий, $N_2H^+(1-0)$ и $N_2D^+(1-0)$, в направлении пяти плотных ядер, полученные при помощи телескопа IRAM 30m.

DEUTERIUM FRACTIONATION IN PRE-STELLAR CORES IN THE ρ OPHIUCHI STAR FORMING REGION

I. V. Petrashkevich¹, A. F. Punanova²

¹Ural Federal University

²Laboratory of Astrochemistry and Extraterrestrial Physics, Ural
Federal University

In this work we study deuterium fractionation in dense cores in the ρ Oph star-forming region. Deuterium fractionation is a result of the chemical reactions which take place under conditions of cold dense cores. For this study, we use the observations of two lines, $N_2H^+(1-0)$ and $N_2D^+(1-0)$, towards 5 dense cores, obtained with the IRAM 30m telescope.

В молекулярных облаках формируются плотные ядра, представляющие собой холодный газ и пыль с температурой 10 К и концентрацией 10^4 – 10^7 см⁻³, с преобладанием тепловых движений и высокой долей дейтерированных соединений. Эти объекты очень важны в понимании звездообразования, потому что из них мы узнаем о начальных условиях формирующейся звезды. Высокая доля дейтерированных соединений показывает, что плотное ядро находится близко к стадии начала формирования протозвезды. Для ее определения

используют азотосодержащие молекулы, а не углеродосодержащие, потому что из-за низкой температуры молекулы с углеродом быстро оседают на пыли.

В данной работе рассматривается явление фракционирования дейтерия, в основе которого лежат химические реакции, протекающие в условиях холодных ядер. Для этого используются наблюдательные данные телескопа IRAM 30m для двух линий, $N_2H^+(1-0)$ и $N_2D^+(1-0)$, в направлении пяти плотных ядер. Оцениваются лучевые концентрации молекул N_2H^+ к N_2D^+ . Параметры для их расчета определяются с помощью моделирования сверхтонкой структуры спектральных линий, а затем строятся карты доли дейтерия к N_2H^+ .

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 19-72-00064).

МОДИФИЦИРОВАННАЯ МЕТОДИКА ВЫЯВЛЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ ВЕКОВЫХ РЕЗОНАНСОВ В ДИНАМИКЕ ОКОЛОПЛАНЕТНЫХ ОБЪЕКТОВ

Н. А. Попандопуло

*Национальный исследовательский Томский государственный
университет*

Представлена модифицированная в части вычисления вековых частот методика выявления и исследования вековых апсидально-нодальных резонансов в динамике искусственных спутников Земли (ИСЗ) и других околопланетных объектов (ОПО).

THE MODIFIED TECHNIQUE FOR THE IDENTIFICATION AND STUDY OF SECULAR RESONANCES IN THE DYNAMICS OF NEAR-PLANETARY OBJECTS

N. A. Popandopulo

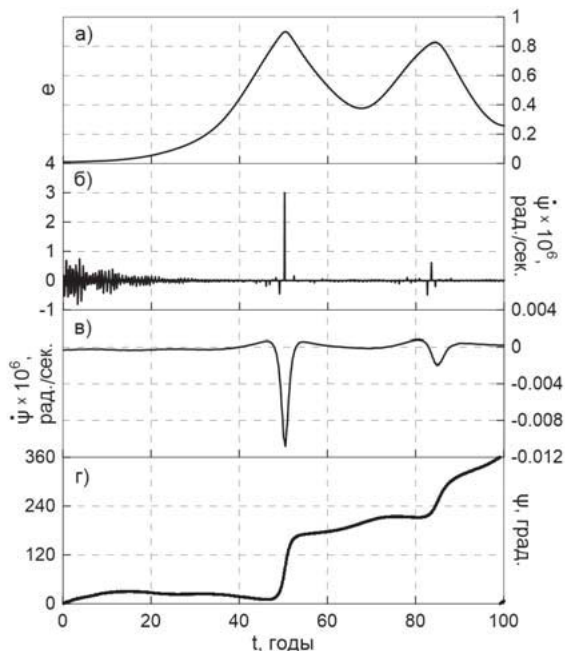
National Research Tomsk State University

The modified method for calculating secular frequencies is presented that reveals and investigates secular apsidal-nodal resonances in the dynamics of artificial Earth satellites (AES) and other near-planetary objects (NPO).

Традиционно используемая методика как в численном [1], так и в аналитическом [2] подходе к исследованию влияния вековых резонансов на динамику ИСЗ состоит в применении аналитических формул для вычисления вековых частот, которые получены для орбит с малыми эксцентриситетами. Особенностью влияния многих вековых апсидально-нодальных резонансов является рост эксцентриситетов орбит объектов. В связи с этим использование аналитических формул для вычисления вековых частот в резонансных аргументах может давать неверную информацию.

В то же время при численном моделировании движения объекта вполне естественно и скорости изменения элементов определять численно по точным формулам.

На рисунке приведены результаты сравнения методик для объекта с начальными параметрами $a = 50\,000$ км, $e = 0.01$, $i = 90^\circ$, подверженного влиянию векового резонанса Лидова—Козаи, что приводит к быстрому росту эксцентриситета. Приведенные данные показывают, что использование приближенных аналитических формул в таком случае некорректно.



Сопоставление методик. Графики эволюции: а) эксцентриситета; б) вековой частоты, полученной по точным формулам; в) вековой частоты, полученной по приближенным формулам; г) критического аргумента

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-72-10022 от 07.08.2019.

Библиографические ссылки

1. *Бордовицына Т. В., Быкова Л. Е., Кардаш А. В. и др.* Эффективные алгоритмы численного моделирования движения ИСЗ // Изв. вузов. Физика. — 1992. — Т. 35. — С. 62—70.
2. *Александрова А. Г., Бордовицына Т. В., Чувашов И. Н.* Численное моделирование в задачах динамики околоземных объектов // Изв. вузов. Физика. — 2017. — Т. 60. — С. 69—76.

ЧИСЛЕННЫЕ МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ СПУТНИКОВ ЗЕМЛИ И ЛУНЫ. ПОСЛЕДНИЕ ВЕРСИИ

**Н. А. Попандопуло, А. Г. Александрова,
Т. В. Бордовицына, И. В. Томилова**
*Национальный исследовательский
Томский государственный университет*

Представлено описание последних версий разработанных в НИИММ НИТГУ численных моделей движения искусственных спутников Земли (ИСЗ) и Луны (ИСЛ) и показаны возможности их использования в решении задач спутниковой динамики.

NUMERICAL MODELS OF MOTION OF ARTIFICIAL SATELLITES OF THE EARTH AND THE MOON. LATEST VERSIONS

**N. A. Popandopulo, A. G. Aleksandrova,
T. V. Bordovitsyna, I. V. Tomilova**
National Research Tomsk State University

A description of the latest versions of the numerical models of the motion of artificial satellites of the Earth (AES) and the Moon (AMS) developed at the RIAMM NRTSU is presented and the possibilities of their use in solving problems of satellite dynamics are discussed.

Численная модель движения ИСЗ — программа с большой историей. Первое описание этой программы было дано [1] в 1992 г. Описание предыдущей версии сделано [2] в 2017 г. В новой версии программы произведена некоторая оптимизация кода, что повысило ее быстродействие при полном сохранении точности прогнозирования. Кроме того, в программу внесено дополнение, которое позволяет одновременно с численным интегрированием движения в прямоугольных координатах вычислять скорости изменения долготы восходящего узла и долготы перигея от узла.

Что касается численной модели движения ИСЛ, то здесь представляется первая пробная версия программы.

© Попандопуло Н. А., Александрова А. Г., Бордовицына Т. В.,
Томилова И. В., 2020

Тип возмущения	Модель движения ИСЗ	Модель движения ИСЛ
Основной потенциал планеты	EGM 2008	LP150Q
Дополнительные возмущения от потенциала	Изменения зональных гармоник. Приливные деформации	
Влияние внешних тел, точечная модель	DE438	DE406
Влияние потенциала внешнего тела	LP150Q	
Световое давление	Конусная модель, искажение диска Солнца	
Релятивистские эффекты	Задача Швардшильда, Линзе—Тирренговая прецессия	
Соппротивление атмосферы	Модель атмосферы NRLMSISE-00	

В обеих программах используются уравнения движения в прямоугольных координатах и метод интегрирования Гаусса—Эверхарта высокого порядка.

Данные о структуре возмущающих сил, учитываемых в программах, приведены в таблице.

В докладе обсуждаются возможности использования той и другой численных моделей в задачах динамики искусственных спутников Земли и Луны.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ в рамках научного проекта № 19-72-10022 от 07.08.2019.

Библиографические ссылки

1. *Бордовицына Т. В., Быкова Л. Е., Кардаш А. В. и др.* Эффективные алгоритмы численного моделирования движения ИСЗ // Изв. вузов. Физика. — 1992. — Т. 35. — С. 62—70.
2. *Александрова А. Г., Бордовицына Т. В., Чувашов И. Н.* Численное моделирование в задачах динамики околоземных объектов // Изв. вузов. Физика. — 2017. — Т. 60. — С. 69—76.

СЕДИМЕНТАЦИЯ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ И МАЛЫХ ТЕЛ В ПРОТОСОЛНЕЧНОЙ ТУМАННОСТИ

Е. И. Прокопьева

Челябинский государственный университет

Исследуется динамика пылинок и малых тел в протосолнечной туманности. Аналитическое и численное решения показывают, что движение тел размером $a \sim 10^2$ см в области $r < 0.1$ а. е. носит колебательный характер. В случае частиц меньших размеров в области по $r < 40$ а. е. движение представляет собой аperiодическое затухание. Оцениваются времена седиментации частиц.

SEDIMENTATION OF DUST PARTICLES AND SMALL BODIES IN THE PROTOSOLAR NEBULA

E. I. Prokop'eva

Chelyabinsk state university

The dynamics of dust particles and small bodies in a protosolar nebula is investigated. The analytical solution and numerical calculations show that the motion of small bodies of size $a \sim 10^2$ cm in the region $r < 0.1$ AU is oscillatory. In the case of smaller particles the motion is an aperiodic attenuation in the region of r up to 40 AU. Sedimentation time in the protosolar nebula is estimated.

Благодаря совершенствованию наблюдательных техник в последние годы отмечается лавинообразный рост числа планет, обнаруживаемых у других звезд. Появляются возможности прямого наблюдения зародышей планет в протопланетных дисках. В связи с этим актуальной задачей является исследование механизмов образования планет в протопланетных дисках.

Существует два основных сценария формирования планет — аккреция на ядро и гравитационная неустойчивость диска. Согласно первому сценарию сначала в диске образуются планетезимали — твердые зародыши планет. Их формирование происходит за счет слипания пылевых частиц или гравитационной фрагментации слоя пылинок, образовавшегося в экваториальной плоскости диска за

счет седиментации [1]. Под седиментацией подразумевается оседание частиц к экваториальной плоскости под действием силы гравитации.

В работе исследуется седиментация пылевых частиц в протопланетных дисках и, в частности, в протосолнечной туманности. Уравнение движения частицы записывается с учетом силы тяжести звезды, центробежной силы и силы сопротивления. Плотность и температура протосолнечной туманности рассчитываются с помощью модели солнечной туманности минимальной массы [2] и модели аккреционных дисков молодых звезд с остаточным магнитным полем, разработанной Дудоровым и Хайбрахмановым [3–5]. Вертикальная структура диска определяется из уравнения гидростатического равновесия.

Уравнение движения частицы решается аналитически в простейшем случае постоянной плотности и численно методом Рунге—Кутты 4-го порядка точности в общем случае. Рассматриваются частицы различных размеров в диапазоне $[10^{-4}, 10^2]$ см.

Аналитическое решение и численные расчеты показывают, что возможны несколько режимов динамики частиц и малых тел в зависимости от их размеров. Движение малых тел размером $a \sim 10^2$ см на расстояниях $r < 0.1$ а. е. от звезды носит колебательный характер. Движение частиц меньшего размера в области r до 40 а. е. представляет собой апериодическое затухание.

Оцениваются времена седиментации частиц в различных частях протосолнечной туманности. Обсуждается проблема образования планет в протосолнечной туманности.

Библиографические ссылки

1. *Goldreich P., Ward W. R.* The Formation of Planetesimals // *Astrophys. J.* — 1973. — Vol. 183. — P. 1051–1062.
2. *Weidenschilling S. J.* Aerodynamics of solid bodies in the solar nebula // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1997. — Vol. 180. — P. 57–70.
3. *Дудоров А. Е., Хайбрахманов С. А.* Кинематическая МГД модель аккреционных дисков молодых звезд. Аналитическое решение // *Вестн. Челяб. гос. ун-та.* — 2013. — № 9 (300). — С. 27–39.
4. *Дудоров А. Е., Хайбрахманов С. А.* Кинематическая МГД модель аккреционных дисков молодых звезд. Численные расчеты // *Вестн. Челяб. гос. ун-та.* — 2013. — № 9 (300). — С. 40–52.
5. *Dudorov A. E., Khaibrakhmanov S. A.* Fossil magnetic field of accretion disks of young stars // *Astrophys. Space. Sci.* — 2014. — Vol. 352. — P. 103–121.

ПОИСК И ИССЛЕДОВАНИЕ КАНДИДАТОВ В ПЛАНЕТАРНЫЕ ТУМАННОСТИ В КАРЛИКОВОЙ ГАЛАКТИКЕ NGC 3077

А. М. Сыпкова

Санкт-Петербургский государственный университет

Изображения галактики NGC 3077, полученные с помощью фотометра с перестраиваемым фильтром MaNGaL на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ, использованы для определения ионизационного состояния газа компактных эмиссионных объектов. Отношение эмиссионных линий в большей части найденных нами источников в линии [OIII] соответствует кандидатам в планетарные туманности.

SEARCH AND STUDY OF PLANETARY NEBULAE CANDIDATES IN THE DWARF GALAXY NGC 3077

A. M. Sypkova

Saint Petersburg State University

Images of the NGC 3077 galaxy obtained with a tunable-filter imager MaNGaL at the 2.5-m SAI MSU telescope are used to determine the gas ionization state of compact emission objects. The emission lines ratio in most of the detected sources in the [OIII] line corresponds to planetary nebulae candidates.

Исследование популяции планетарных туманностей в галактиках ранних типов актуально как для измерения металличности газа, так и для изучения внутренней галактической кинематики. Близкая карликовая эллиптическая галактика NGC 3077 — один из интереснейших членов богатой газом группы галактик М 81, но отождествление планетарных туманностей в NGC 3077 до сих пор не выполнено. Мы использовали изображения галактики, полученные с помощью фотометра с перестраиваемым фильтром MaNGaL на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ, для определения ионизационного состояния газа компактных эмиссионных объектов. Отношение эмиссионных линий в большей части найденных нами источников в линии [OIII] соответствует кандидатам в планетарные туманности. Также нами проведен

анализ архивных спектроскопических данных, полученных с помощью многорежимного фокального редуктора первичного фокуса 6-м телескопа САО РАН SCORPIO-2. Три из найденных кандидатов попали на щель спектрографа. Был выделен их интегральный спектр, измерено отношение эмиссионных линий. Спектры выделенных источников соответствуют ожидаемому для планетарных туманностей.

ОРБИТАЛЬНЫЙ СОСТАВ ВНУТРЕННИХ БАРОВ В ДИСКОВЫХ ГАЛАКТИКАХ

И. С. Тихоненко

Санкт-Петербургский государственный университет

В работе детально исследуется орбитальный состав B/PS баров дисковых галактик, получаемых в N-body экспериментах. Для нескольких моделей проведен фурье-анализ орбит всех частиц, найдены основные частоты. Обнаружен второй (внутренний) бар в симуляциях без учета газа. Описаны основные семейства орбит, составляющих центральный бар, и выявлена их связь с параметрами подстилающей галактики.

ORBITAL COMPOSITION OF INNER BARS IN DISK GALAXIES

I. S. Tikhonenko

Saint Petersburg State University

In this work we thoroughly investigate the orbital composition of B/PS bars in disk galaxies obtained from N-body simulations. For several selected models we apply a Fourier transform to orbits of all particles to find dominate frequencies. A secondary (inner) bar was detected in simulations without gas component. We describe main orbital families composing secondary bar and reveal their connections with the host galaxy parameters.

Бары встречаются в 60 % дисковых галактик (например, [1]). Расчеты показывают, что бар — почти неизбежный результат вековой эволюции тонких звездных дисков. Более того, на большой шкале времени бары могут расти в вертикальном направлении и приобрести арахисоподобную форму [2]. При наблюдении галактик почти плашмя выявляют три морфологически различных типа баров: бары с эллиптическими изофотами, бары с ящикообразными изофотами и так называемые линзовидные бары [3]. Последние типы баров характерны, как правило, для галактик ранних типов, и примерно в 30 % случаев у таких баров обнаруживается второй (внутренний) бар [4]. Считается, что внутренние бары могут поддерживаться семейством

периодических орбит, ориентированных перпендикулярно большой оси внешнего бара. Однако еще ни разу в расчетах в рамках задачи N тел (без газа) ни такие бары, ни такие орбиты не были выявлены. В данной работе с помощью фурье-анализа были детально изучены все орбиты в ряде моделей ($N = 4 \cdot 10^6$ для каждой модели), описанных в [5, 6]. Все орбиты были разбиты на семейства по отношению основных частот, полученных из максимумов периодограммы. Особое внимание было уделено исследованию центральных областей баров. При этом удалось выявить семейства орбит, поддерживающих второй (внутренний) бар. Некоторые из этих семейств ранее не описаны в литературе. Найдено, при каких параметрах основной галактики эти орбиты из данных семейств начинают доминировать и внутренний бар проявляет себя визуально.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-02-00249 (руководитель Н. Я. Сотникова)

Библиографические ссылки

1. *Marinova I., Jogee S.* Characterizing Bars at $z \sim 0$ in the Optical and NIR: Implications for the Evolution of Barred Disks with Redshift // *Astrophys. J.* — 2007. — Vol. 659, № 2. — P. 1176–1197. [astro-ph/0608039](#).
2. *Combes F., Sanders R. H.* Formation and properties of persisting stellar bars. // *Astron. Astrophys.* — 1981. — Vol. 96. — P. 164–173.
3. *Laurikainen E., Salo H.* Barlenses and X-shaped features compared: two manifestations of boxy/peanut bulges // *Astron. Astrophys.* — 2017. — Vol. 598. — P. A10. [1609.01936](#).
4. *Erwin P.* Double-barred galaxies. // *Memorie della Societa Astronomica Italiana Supplementi.* — 2011. — Vol. 18. — P. 145.
5. *Smirnov A. A., Sotnikova N. Y.* What determines the flatness of X-shaped structures in edge-on galaxies? // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2018. — Vol. 481, № 3. — P. 4058–4076. [1809.06167](#).
6. *Smirnov A. A., Sotnikova N. Y.* Is the late buckling stage inevitable in the bar life? // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2019. — Vol. 485, № 2. — P. 1900–1905. [1902.08485](#).

ОЦЕНКА ТЕМПА ПОТЕРИ ВЕЩЕСТВА СОЛНЦЕМ ЗА СЧЕТ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

С. С. Турыгин

Санкт-Петербургский государственный университет

В работе представлены результаты определения интегрального потока протонов и альфа-частиц, составляющих основную часть уносимой от Солнца массы. Параметры потока были взяты из архива наблюдений автоматической межпланетной станции Ulysses. Обработка производилась с помощью самостоятельно написанной программы. Построены 2-мерные и 3-мерные графики, наглядно иллюстрирующие происходящие в солнечном ветре процессы. Полученный таким образом результат хорошо согласуется с результатами, представленными другими авторами, полученными с использованием иных методик.

EVALUATION OF SOLAR MASS LOSS RATE DUE TO THE SOLAR WIND

S. S. Turygin

Saint Petersburg State University

We present the results of determining the integral flux of protons and alpha particles, which make up the bulk of the mass carried away from the Sun. The flow parameters were taken from the observation archive of the Ulysses spacecraft. We used a self-written program to process observations. 2-dimensional and 3-dimensional graphs are plotted that clearly illustrate the processes occurring in the solar wind. The result obtained in this way is in good agreement with the results presented by other authors obtained using other methods.

В работе представлены результаты определения интегрального потока протонов и альфа-частиц, составляющих солнечный ветер, и оценка уносимой данными частицами массы по данным автоматической межпланетной станции Ulysses. Данные были взяты из архива ESA: <http://ufa.esac.esa.int/ufa/#data>. Их обработка производилась с помощью специально написанной программы и включала в

себя редукцию ошибок, возможность интерполяции данных и интегрирование полученных результатов. В процессе работы построены 2-мерные и 3-мерные графики: плотности потока, скорости частиц, точного положения аппарата в пространстве и другие — для анализа характеристик плазмы солнечного ветра. Важно, что аппарат *Ulysses* имел почти полярную гелиоцентрическую орбиту, благодаря которой впервые удалось измерить характеристики потока солнечного ветра практически на всех гелиоцентрических широтах, не ограничиваясь плоскостью эклиптики, как это происходило при более ранних наблюдениях с аппаратов в окрестности эклиптики.

Следует отметить продолжительный срок службы аппарата — 18 лет, в течение которого удалось набрать достаточный для подробного анализа массив данных. Аппарат получал и передавал на Землю данные с 1990 по 2008 г., полностью покрыв, таким образом, 23-й цикл солнечной активности, а также конец 22-го и начало 24-го. Полученная оценка $(\dot{GM}_{\odot}) = 4.81 \cdot 10^{-14} \pm 0.96 \cdot 10^{-14} M_{\odot}/\text{год}$ с учетом возможных колебаний солнечной активности на продолжительных временных интервалах хорошо согласуется с результатами, полученными другими авторами при помощи разных методик. Уточнение потери массы за счет солнечного ветра важно для уточнения темпа изменения массы Солнца за счет всех эффектов (излучение, солнечный ветер, падение межпланетного вещества и комет, нейтрино и др.). Это, в свою очередь, дает возможность, если найти изменение гравитационной постоянной Солнца (\dot{GM}_{\odot}) по движениям планет, определить ограничения для изменения гравитационной постоянной (\dot{G}) .

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ
СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ОТ НЕОДНОРОДНОГО ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО
СТРУЙНОГО ВЫБРОСА: УЯРЧЕНИЕ К КРАЮ**

В. А. Фролова, Е. Е. Нохрина

Московский физико-технический институт

Работа посвящена построению яркостных карт синхротронного излучения с самопоглощением для цилиндрического релятивистского струйного выброса. Подробно проанализированы случаи различной оптической толщи среды и различных углов наблюдения.

**INTENSITY DISTRIBUTION OF SYNCHROTRON
RADIATION FROM A INHOMOGENEOUS
CYLINDRICAL JET: THE LIMB BRIGHTENING EFFECT**

V. A. Frolova, E. E. Nokhrina

Moscow Institute of Physics and Technology

The work is devoted to the computing of intensity maps of synchrotron radiation with self-absorption for a cylindrical relativistic jet. We analyze in detail the cases of different optical depths of the medium and various viewing angles.

Релятивистские струйные выбросы (джеты) из активных ядер галактик (АЯГ) являются одними из самых ярких объектов во всех диапазонах электромагнитного излучения.

Работа посвящена построению яркостных карт синхротронного излучения с самопоглощением для цилиндрического релятивистского струйного выброса. В работе мы рассматриваем модель джета, предложенную Бескиным [1]. Мы используем поперечную структуру выброса, полученную в рамках этой модели, для воспроизведения наблюдаемых особенностей синхротронного излучения, в частности, эффекта уярчения к краю; мы подробно анализируем случаи различной оптической толщи среды и различных углов наблюдения. Данная модель была выбрана, так как мы ожидали, что увеличение

концентрации плазмы к краю выброса вместе с меньшим Лоренц-фактором приведет к появлению наблюдаемого эффекта уярчения к краю. Для построения профилей интенсивности мы решаем уравнение переноса синхротронного излучения с самопоглощением [2].

Для струйного выброса, наблюдаемого под углом $\pi/2$, мы получили ожидаемый эффект уярчения к краю в случае оптически тонкого или почти оптически тонкого выброса. С другой стороны, для малого угла наличие этого эффекта уже является зависимым от рассматриваемой частоты и изменение характера зависимости проявляется при изменении частоты менее чем на порядок. Мы предсказываем, что в рамках рассмотренной модели при наблюдении под небольшими углами (порядка 5 градусов) на разных частотах будет наблюдаться уярчение различных частей джета.

Библиографические ссылки

1. *Beskin V. S., Chernoglazov A. V., Kiselev A. M., Nokhrina E. E.* On the internal structure of relativistic jets collimated by ambient gas pressure // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2017. — Vol. 472. — P. 3971–3978.
2. *Rybicki G. B., Lightman A. P.* Radiative Processes in Astrophysics. — 1986.

ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТОДА ПОИСКА НАИЛУЧШЕГО ПРИБЛИЖЕНИЯ НАБЛЮДАЕМОГО МОЛЕКУЛЯРНОГО СПЕКТРА

А. П. Шевелев, С. В. Салий

Уральский федеральный университет

С увеличением количества данных наблюдений возрастает необходимость в упрощении процесса их интерпретации. Для оптимизации процедуры поиска набора физических параметров, наилучшим образом описывающего наблюдаемый молекулярный спектр, была создана программа, позволяющая наглядно сопоставлять модельные и наблюдаемые спектры на основе метода χ^2 . Кроме того, в программу можно подключать различные программы, формирующие модельные спектры, например RADEX, и проводить сравнение методов.

OPTIMIZATION OF A METHOD OF SEARCHING THE BEST APPROXIMATION FOR AN OBSERVED MOLECULAR SPECTRA

A. P. Shevelev, S. V. Salii

Ural Federal University

Since the increasing a number of observational data we need to simplify a process of its interpretation. For optimize the procedure for searching such set of physical parameters that best describes the observed molecular spectrum, we created a program for comparing model and observable spectra based on the χ^2 method. Moreover we can connect to the program various methods of model spectra formation, for example, RADEX, and conduct comparison of the methods.

Представленная программа упрощает процесс сравнения модельного и наблюдаемого спектров. Сравнение осуществляется с применением χ^2 статистики. Значение χ^2 считается для каждой из линий в исследуемом частотном диапазоне, для заданных физических параметров. В частности, предусмотрена возможность посчитать значение χ^2 для модельных спектров, полученных из программы RADEX

[1]. Используя вычисленные значения χ^2 , можно найти такой набор физических параметров, при которых модельный спектр наилучшим образом описывает наблюдаемый спектр, что не было учтено в RADEX.

Работа поддержана Министерством науки РФ, базовая часть госзадания, РК № АААА-А17-117030310283-7, и Правительством РФ, контракт № 02.А03.21.0006, постановление № 211.

Библиографические ссылки

1. *Tak van der F. F. S., Black F. L., Schoier F. L. et al.* A computer program for fast non-LTE analysis of interstellar line spectra // *Astron. Astrophys.* — 2007. — Vol. 468. — P. 627—635.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭМИССИОННОГО СПЕКТРА ТУМАННОСТИ ВОКРУГ ЗВЕЗДЫ WNL В ГАЛАКТИКЕ NGC 4068

А. Д. Яровова, О. В. Егоров

*Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,
Государственный астрономический институт им. Штернберга*

Мы провели исследование компактного объекта с пекулярным эмиссионным спектром, обнаруженного ранее в низкометаллической галактике NGC 4068. Анализ спектральных и фотометрических данных в оптическом диапазоне указывает на то, что объект может являться туманностью вокруг звезды Вольфа—Райе позднего спектрального типа, находящейся на короткой эволюционной стадии. Для проверки этого предположения мы провели моделирование спектра туманности при помощи фотоионизационного кода CLOUDY. Полученные синтетические спектры хорошо описывают основные особенности наблюдаемого спектра объекта.

MODELLING OF EMISSION SPECTRUM OF THE NEBULA SURROUNDING THE WNL STAR IN THE GALAXY NGC 4068

A. D Yarovova, O. V. Egorov

¹Moscow State University, Sternberg Astronomical Institute

We studied a compact object with a peculiar emission spectrum previously discovered in a low-metallicity galaxy NGC 4068. Analysis of spectroscopic and photometric data in optical range points out that the object may be a nebula, associated with late-type Wolf—Rayet star during a short evolutionary stage. To verify this assumption, we performed a spectrum simulation using CLOUDY photoionization code. Observed spectrum of the object turned out to be well-described by the obtained syntetic spectrum.

При изучении III-областей в галактике с низкой металличностью NGC 4068 с помощью сканирующего интерферометра Фабри—Перро была обнаружена неразрешимая туманность с необычным спектром, не характерным для простых III областей. Для изучения данного

объекта был получен длиннощелевой спектр на 6-метровом телескопе БТА САО РАН.

В полученном спектре присутствуют интенсивные линии [NII], H_α , [OIII], но при этом практически отсутствуют линии [SII]. Наблюдаемая линия HeII 4686Å указывает на то, что объект может являться звездой Вольфа—Райе (WR). В качестве возможного механизма, объясняющего наблюдаемый эмиссионный спектр, мы рассматриваем ионизацию звездой WR позднего типа (WNL), находящейся в короткоживущей эволюционной стадии, окружающей туманности. Целью настоящей работы является проверка этого предположения путем построения фотоионизационной модели туманности. Моделирование произведено при помощи программы по расчету фотоионизации газовых туманностей CLOUDY [1].

В качестве источника ионизации мы использовали предоставленные нам модели атмосфер звезд WNL с различными параметрами, построенные для объяснения наблюдений звезды LBV в галактике M33 [2]. Нами были построены одномерные модели спектра туманности. При моделировании туманности варьировались следующие параметры: внешний и внутренний радиусы туманности, электронная плотность, металличность, болометрическая светимость звезды.

Используя имеющуюся сетку моделей атмосфер WNL звезд с различными параметрами, мы получили синтетические спектры и сравнили их с наблюдаемым спектром объекта. Качественное сравнение показывает, что некоторые из полученных модельных спектров близки по соотношению линий [NII]/ H_α , [SII]/ H_α , [OIII]/ H_α к наблюдаемому спектру туманности и позволяют описать наблюдаемый спектр. Это подтверждает гипотезу о том, что исследуемый объект может являться звездой WNL на поздней стадии эволюции.

Работа выполнена при поддержке гранта Программы развития МГУ «Ведущая научная школа "Физика звезд, релятивистских объектов и галактик" и гранта РФФИ №18-02-00976.

Библиографические ссылки

1. *Ferland G. J., Chatzikos M., Guzmán F. et al.* The 2017 Release Cloudy // Rev. Mex. Astron. Astrofis. — 2017. — Vol. 53. — P. 385–438. 1705.10877.
2. *Maryeva O., Abolmasov P.* Modelling the optical spectrum of Romano's star // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2012. — Vol. 419. — P. 1455–1464. 1109.0443.

МЕТАПРЕДМЕТНЫЙ ПОДХОД В ИЗУЧЕНИИ АСТРОНОМИИ

Д. С. Быстров, О. В. Ахметова

*Башкирский государственный университет, Стерлитамакский
филиал*

В статье рассматриваются вопросы метапредметного подхода в изучении астрономии как проектного метода формирования мировоззрения на основе научного, философского и аксиологического осмысления явлений и идей. Раскрываются компоненты метапредметного подхода, стратегические решения.

META-SUBJECT APPROACH TO STUDY OF ASTRONOMY

D. S. Bystrov, O. V. Akhmetova

Bashkir State University, Sterlitamak Branch

The article discusses the issues of meta-subject approach in the study of astronomy as a design method for forming a worldview based on a scientific, philosophical and axiological understanding of phenomena and ideas. The components of the meta-subject approach, strategic decisions are revealed.

В настоящее время в образовательные стандарты вводится метапредметный подход. Современному специалисту мало быть погруженным только в свою профессию, необходимо знать специфику смежных наук, видеть возможности реализации межпредметных проектов. Этот подход призван решить проблему разобщенности школьных дисциплин, а также способствовать развитию универсального мышления, научного мировоззрения, формированию общей культуры школьника.

Автор работы «Метапредметный подход в современной школе» В. Н. Клепиков считает, что метапредметный подход в образовательном процессе школы реализуется на дополняющих друг друга уровнях — исследовательском, философском и аксиологическом. На исследовательском уровне школьники ставят и решают различные

проблемы межпредметного характера. Философский уровень позволяет делать обобщения общекультурного и мировоззренческого характера. На аксиологическом же уровне научные понятия из различных предметов органично интегрируются. Астрономия, вернувшаяся в школу, представляет именно такую интегральную науку. Она позволяет связать разные школьные предметы между собой.

Первый вопрос при формировании мотивации детей к изучению астрономии: «Для чего нужно изучать астрономию?». Обучающиеся часто отвечают: «Человечество ищет новый дом. Нужно изучать другие планеты и их спутники, а также возможности их колонизации». Здесь метапредметным проектом может являться, например, колонизация Луны.

При долгом проживании вне земного пространства возникает большое количество проблем, связанных с безопасностью астронавтов — от доставки колонистов на станцию до поддержания комфортного уровня проживания на лунном модуле. Чтобы долго жить и трудиться на Луне, нужно хорошо питаться, поэтому проблема с выращиванием пищи стоит перед учеными чуть ли не так же остро, как и создание пригодных для жизни модулей, производство скафандров и разработка надежных космических кораблей. Кроме непрерывного снабжения команды космической станции свежими продуктами, модуль будет выполнять и другие функции, связанные с жизнеобеспечением. Это очистка воды, производство кислорода и поглощение углекислого газа, организация сбора и переработки отходов, производство различных видов биопластика, тканей и даже лекарственных препаратов.

Подводя итог, можно сделать вывод, что для проектирования лунной базы необходимы знания из целого ряда школьных предметов: астрономии, биологии, физики, математики, технологии, экономики и др. Такой межпредметный проект помогает формировать целостное мировоззрение обучающихся.

ИЗУЧЕНИЕ ОБЛАСТЕЙ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ В ГАЛАКТИКЕ SEXTANS A

И. С. Герасимов¹, О. В. Егоров²

¹Московский государственный университет, ²Государственный астрономический институт им. Штернберга

Мы исследовали кинематику газа в областях звездообразования в галактике Sextans A. Был проанализирован куб данных в линии H α с высоким спектральным разрешением, полученный на БТА САО РАН с помощью ИФП, и проведено сравнение с кинематикой газа в линии HI 21 см. Были обнаружены области высокоскоростных движений и сделан вывод, что звездообразование распространяется наружу галактики.

STUDY OF STAR-FORMING REGIONS IN THE GALAXY SEXTANS A

I. S. Gerasimov¹, O. V. Egorov²

¹Moscow State University, ²Sternberg Astronomical Institute

We studied gas kinematics in the star-forming regions in the galaxy Sextans A. The data cube in H α line with high spectral resolution obtained at BTA SAO RAS using the FPI was analyzed and a comparison with gas kinematics in the HI 21 cm line was made. Areas of high-velocity motions were discovered and we concluded that star formation propagates outward to the galaxy.

Sextans A является близкой карликовой иррегулярной галактикой с активным звездообразованием, что делает ее идеальным кандидатом для наблюдения процессов взаимодействия массивных звезд и межзвездной среды. В подобных объектах, благодаря толстому газовому диску и отсутствию спиральных волн плотности, образующиеся полости являются долгоживущими и могут достигать более крупных размеров по сравнению с массивными спиральными галактиками. Приток энергии от нескольких поколений ОВ-звезд приводит к формированию так называемых сверхгигантских оболочек размером до 2 кпк [1]. Sextans A — одна из немногих близких галактик,

в межзвездной среде которых наблюдается такая структура размером со всю галактику [2]. Для нас представляют интерес процессы, приводящие к вспышке звездообразования в стенках сверхоболочек, а также то, как происходящее звездообразование влияет на дальнейшую эволюцию межзвездной среды.

Для поиска интересующих нас сверхзвуковых движений мы построили карты лучевых скоростей и дисперсии скоростей ионизованного газа на основе данных, полученных на 6-м телескопе БТА САО РАН со сканирующим интерферометром Фабри—Перо. Были идентифицированы несколько областей с повышенной дисперсией газа. Профиль линии $H\alpha$ в этих областях существенно асимметричен или даже показывает наличие двух компонент, что является указанием на наличие сверхзвуковых движений или расширяющихся пузырей ионизованного газа. Мы сопоставили распределение эмиссии в линии $H\alpha$ и в далеком УФ-диапазоне, которые являются индикатором происходящего звездообразования на разных временных шкалах [3], и сделали вывод, что оно распространяется наружу сверхоболочки HI.

В результате исследования структуры и кинематики ионизованного газа в галактике Sextans A мы выявили признаки инициированного звездообразования и высокоскоростных движений в межзвездной среде, которые, вероятно, связаны с действием массивных звезд. Дальнейший детальный анализ кинематики в линиях $H\alpha$ и HI 21 см и сопоставление с локализацией ОВ-звезд позволят обнаружить возможные признаки разрушения или, наоборот, поддержания расширения сверхгигантской оболочки, а также дадут информацию о влиянии ударных волн на образование диффузного ионизованного газа.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19–72–00149.

Библиографические ссылки

1. Warren S. R., Weisz D. R., Skillman E. D. et al. The formation of kiloparsec-scale HI holes in dwarf galaxies // *The Astrophysical Journal*. — 2011. — Vol. 738, № 1. — P. 10.
2. Egorov O. V. et al. Star formation complexes in the ‘galaxy-sized’ supergiant shell of the galaxy HolmbergI // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2018. — Vol. 478, № 3. — P. 3386–3409. 1805.00315.
3. Leitherer C., Schaerer D., Goldader J. D. et al. Starburst99: Synthesis Models for Galaxies with Active Star Formation // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* — 1999. — Vol. 123, № 1. — P. 3–40. astro-ph/9902334.

СТАБИЛЬНОСТЬ КРУГОВЫХ ОРБИТ ФОТОНОВ В ГАЛАКТИЧЕСКИХ ГАЛО

Г. Р. Нигматуллина¹, Г. М. Гарипова², А. А. Потапов¹

¹ *Стерлитамакский филиал Башкирского государственного университета,* ² *Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы*

В статье рассматривается стабильность круговых орбит фотонов в галактических гало, методом динамических систем.

STABILITY OF CIRCULAR ORBITS OF PHOTONS IN GALACTIC HALO

G. R. Nigmatullina¹, G. M. Garipova², A. A. Potapov¹

¹ *Sterlitamak branch of Bashkir State University,* ² *Bashkir State Pedagogical University named after M. Akmulla*

The article considers the stability of the circular orbits of photons in galactic halo, using the dynamic system method.

Полезным приложением метода динамических систем является изучение движения частиц, образующих галактические гало. Рассмотрим этот способ на примере фотонов, используя полевые уравнения Вейля. Метрика Маннгейма-Казанаса-де Ситтера задается выражением ($G = 1$, $c = 1$)

$$d\tau^2 = B(r)dt^2 - \frac{1}{B(r)}dr^2 - r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2), B(r) = 1 - \frac{2M}{r} + \gamma r - kr^2, \quad (1)$$

где k, γ — константы. Вводя обозначение $u = \frac{1}{r}$ [1], получим уравнение траектории пробной частицы массы m_0 на экваториальной плоскости $\theta = \frac{\pi}{2}$

$$\frac{d^2u}{d\varphi^2} = -u + 3Mu^2 - \frac{\gamma}{2} + \frac{M}{h^2} + -\frac{1}{2h^2u^2}(\gamma - \frac{2k}{u}), \quad (2)$$

где h — угловой момент. Для фотона, масса которого равна нулю, (2) принимает вид конформно инвариантного уравнения уже без константы k :

$$\frac{d^2u}{d\varphi^2} = -u + 3Mu^2 - \frac{\gamma}{2}. \quad (3)$$

Чтобы решить (3) не непосредственным интегрированием, а методом динамических систем, перейдем от одного дифференциального уравнения второго порядка к двум уравнениям первого порядка. Введем обозначение

$$u = x, y = \dot{x} = \frac{dx}{d\varphi}, \quad (4)$$

чтобы получить систему

$$\dot{x} = X(x, y) = y, \quad (5)$$

$$\dot{y} = Y(x, y) = a + bx + cx^2 + dx^{-2} + ex^{-3}, \quad (6)$$

в которой

$$a = \frac{M}{h^2} - \frac{\gamma}{2}, b = -1, c = 3M, d = \frac{\gamma}{2h^2}, e = -\frac{k}{h^2}. \quad (7)$$

Условие $\dot{x} = 0$ дает $r = R = \text{constant}$, а $\dot{y} = 0$ дает

$$h^2 = -\frac{2MR^2 + R^4(\gamma - 2kR)}{R(2 + \gamma R) - 6M}, \quad (8)$$

где $R(2 + \gamma R) - 6M \neq 0$.

Точкам равновесия соответствует $\dot{x} = 0$ и $\dot{y} = 0$ то есть $(\frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2c}, 0)$ и $(\frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2c}, 0)$. Чтобы эти точки оказались на действительной, а не на мнимой фазовой плоскости, мы должны положить $\alpha^2 \equiv b^2 - 4ac = 1 + 6\gamma M \geq 0$. При $\alpha^2 = 0$ две точки равновесия редуцируются в одну: $P(\frac{1}{6M}, 0)$. При $\alpha^2 > 0$ всегда существуют две различные точки $Q_{\pm}(\frac{1 \pm \alpha}{6M}, 0)$, где $\alpha = \pm\sqrt{1 + 6\gamma M}$. Таким образом, Q_{\pm} соответствует двум радиусам, зависящим от γ , $R_{\pm} = \frac{6M}{1 \pm \sqrt{1 + 6\gamma M}}$.

Из уравнения (8) следует:

$$q_{0\pm} = 1 - \frac{6M}{R_{\pm}}. \quad (9)$$

Таким образом, метод динамических систем, позволяющий получить представление о поведении частиц без непосредственного решения уравнений движения, может быть успешно использован в решении ряда космологических задач.

Библиографические ссылки

1. Чандрасекар С. Математическая теория черных дыр. В 2-х томах. — М: Мир, 1986.

ЗАВИСИМОСТЬ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИНТЕЗА МЕТАНОЛА ОТ ПАРАМЕТРОВ ХИМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

А. В. Ускова

Московский педагогический государственный университет

В работе исследуется зависимость газофазного содержания метанола в плотных холодных облаках от параметров его синтеза на поверхностях космических пылинок. Рассмотрены глубина активных центров на поверхности пылинки, эффективность реактивной десорбции, вероятность прилипания молекул к пылинке, принятые энергии десорбции.

DEPENDENCE OF THE METHANOL SYNTHESIS EFFICIENCY ON THE PARAMETERS OF THE CHEMICAL MODEL

A. V. Uskova

Moscow Pedagogical State University

We study dependence of gas-phase methanol content in dense cold clouds on the parameters of its synthesis on surfaces of space dust grains. Depth of active sites on a grain surface, reactive desorption efficiency, sticking probability, adopted desorption energies are considered.

Метанол — одна из наиболее часто наблюдаемых межзвездных молекул, однако в вопросе о его происхождении остается до сих пор много неясного. Одной из существующих проблем является относительно высокое содержание метанола в холодных плотных облаках [1], где он может синтезироваться только на поверхностях космических пылинок, а затем каким-то образом десорбировать в газовую фазу. Нами рассмотрена зависимость предсказываемого газофазного содержания метанола в условиях плотных холодных молекулярных облаков от некоторых параметров химических моделей. Для исследования использована программа астрохимического моделирования Presta, разработанная в Институте астрономии РАН [2].

Была проведена серия расчетов эволюции содержания метанола, а также ряда других молекул в холодном молекулярном облаке при концентрации газа 10^4 см^{-3} и температуре 10 К. В качестве одного из параметров использовалась эффективность реактивной десорбции, которая варьировалась от 0 до 5 %. Было показано, что содержание метанола в газовой фазе критически зависит от учета реактивной десорбции. Нулевая эффективность этого процесса приводит к газофазному содержанию метанола, которое на много порядков величины уступает наблюдаемым значениям. Однако если заданная в модели эффективность реактивной десорбции превосходит 1 %, зависимость содержания метанола от конкретного значения эффективности зависит не так сильно. Содержание метанола в твердой фазе также слабо зависит от принятого значения эффективности реактивной десорбции.

Кроме того, рассмотрены и другие параметры: глубина потенциальной ямы активных центров на поверхности пылинки, принятые энергии десорбции, вероятность прилипания молекул к пылинкам.

Для проверки расчетов рассматривались также содержания CO, CO₂, CH₃OH и NH₃ в ледяных мантиях космических пылинок относительно водяного льда [3].

Библиографические ссылки

1. *Punanova A., Caselli P., Feng S. et al.* Seeds of Life in Space (SOLIS). III. Zooming Into the Methanol Peak of the Prestellar Core L1544 // *Astrophys. J.* — 2018. — Vol. 855, № 2. — P. 112. 1802.00859.
2. *Kochina O. V., Wiebe D. S., Kalenskii S. V., Vasyunin A. I.* Modeling of the formation of complex molecules in protostellar objects // *Astronomy Reports.* — 2013. — Vol. 57, № 11. — P. 818–832.
3. *Öberg K. I., Boogert A. C. A., Pontoppidan K. M. et al.* The Spitzer Ice Legacy: Ice Evolution from Cores to Protostars // *Astrophys. J.* — 2011. — Vol. 740, № 2. — P. 109. 1107.5825.

ПРОБЛЕМЫ ИЗУЧЕНИЯ АСТРОНОМИИ В ШКОЛЕ

Р. Э. Хабибов, О. В. Ахметова

*Башкирский государственный университет,
Стерлитамакский филиал*

Раскрываются сущность и современное состояние проблемы формирования астрономического образования в Башкирии. Изучение астрономии в рамках основного общего образования в Республике Башкортостан ограничено во времени и изолировано от смежных предметов. Зачастую программы по астрономии, физике и математике не согласованы между собой. В связи с этим дополнительное астрономическое образование и кружковая работа на базе планетариев, обсерваторий, дворцов детского и юношеского творчества и музеев космонавтики занимает особое место в формировании естественно-научных представлений учащихся.

PROBLEMS OF STUDYING ASTRONOMY AT SCHOOL

R. E. Khabibov, O. V. Akhmetova

Bashkir State University, Sterlitamak Branch

The essence and current state of the problem of the formation of an astronomical formation in Bashkiria is revealed. The study of astronomy within the framework of basic general education in the Republic of Bashkortostan is limited in time and isolated from related subjects. Often programs in astronomy, physics and mathematics are not consistent. In this regard, additional astronomical education and circle work on the basis of planetariums, observatories, palaces for children and youth creativity and space museums occupies a special place in the formation of students' natural-scientific representations.

С конца 80-х — начала 90-х гг. XX в. начали исключать из школьной программы астрономию. Перестали быть актуальными педагоги по данной дисциплине, общий уровень знания науки о Вселенной среди молодого подрастающего поколения упал, интерес к ней — тоже [1]. Астрономия — наука о Вселенной, о ее структуре, движении, эволюции космоса, которая может формировать научный взгляд на

окружающий мир у детей с малых лет, выработать любовь к самообучению, стремлению познать окружающий мир и многое-многое другое. Проблемы изучения астрономии связаны с тем, что

- изучение астрономии ограничено старшими классами;
- время, выделяемое для астрономии, не превышает двух часов в неделю для среднестатистической школы в нашей стране, чаще всего это один час в неделю;
- материальное обеспечение школ для наблюдений небесных объектов недостаточно, а порой и вовсе отсутствует;
- наблюдение в ночное время вне города/села сопряжено с большими рисками как для самих организаторов, так и для обучающихся;
- знания физики и математики, особенно в классах базового уровня, недостаточны для освоения материала по астрономии.

Широта круга проблем и трудоемкость их решения требуют комплексного подхода к формированию астрономических знаний обучающихся. Это и добавление начальных представлений, понятий и знаний о мегамире и месте человека в нем в такие школьные предметы, как окружающий мир, природоведение, естествознание, география, история, математика, физика. И согласование между собой программ по астрономии, физике и математике. И использование для дополнительного астрономического образования материально-технического обеспечения планетариев, обсерваторий, Дворцов детского и юношеского творчества, музеев космонавтики и т. д. [1]. А освоение современного высокотехнологичного оборудования и интерактивного программного обеспечения [2], в том числе отечественных программ [3], позволяет сделать обучение более наглядным.

Библиографические ссылки

1. *Тихомирова Е. Н., Иродова И. А.* Формирование астрономической картины мира школьников // Ярослав. пед. вестн. — 2017. — Т. 2. — С. 72—76.
2. *Перевозищев Д. В., Сауров Ю. А.* О методике организации познавательной деятельности при изучении астрономии в курсе физики // Вестн. Вят. гос. гуманит. ун-та. — 2015. — Т. 3. — С. 126—131.
3. *Крячко И. П.* Выполнение практических работ по астрономии с использованием информационно-коммуникационных технологий // Учебный эксперимент в образовании. — 2013. — Т. 3. — С. 22—26.

РЕДУКЦИЯ ФОТОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ТЕЛЕСКОПА ASTROSIB-500RC

Я. Ю. Ватолин¹, С. Ю. Горда²

¹ *Уральский федеральный университет,*

² *Астрономическая обсерватория*

Уральского федерального университета

Определены коэффициенты перехода от инструментальной фотометрической системы к стандартной системе Cousins для телескопа AstroSib-500RC, найденные по стандартным звездам центральной части скопления M67

REDUCTION OF THE PHOTOMETRIC SYSTEM OF THE TELESCOPE ASTROSIB-500RC

Y. Yu. Vatolin¹, S. Yu. Gorda²

¹ *Ural Federal University,*

² *Astronomical Observatory of Ural Federal University*

The transformation coefficients from the instrumental magnitudes to the standard Cousins system for the telescope AstroSib-500RC was determined by standard central stars of cluster M67.

С декабря 2018 г. на телескопе-рефлекторе системы Риччи—Кретьена AstroSib-500RC ($D = 0.5$ м, $F = 4.0$ м) Коуровской астрономической обсерватории УрФУ проводятся фотометрические наблюдения. Телескоп оснащен ПЗС-камерой PL230 с ПЗС-чипом E2V (2048×2048 , 15 мкм). Фотометрическая система, близкая к стандартной UBVRI Джонсона—Казинса, реализована с помощью интерференционных фильтров фирмы FLI. Весной 2019 г. на телескопе был получен ряд ПЗС кадров рассеянного звездного скопления M67 для определения коэффициентов редукции инструментальной фотометрической системы в стандартную. После проведения стандартных операций вычитания темнового кадра и деления на плоское поле все полученные ПЗС-кадры в каждом из BVRI фильтров были объединены в суммарные кадры посредством медианного усреднения. В результате были получены четыре рабочих кадра — по одному в каждом фильтре, с которыми и проводилась дальнейшая работа. Такая

процедура позволяет производить фотометрию изображений звезд, распределенных в большем интервале звездных величин, чем в отдельном кадре, когда для слабых звезд отсчеты в пикселах сравнимы с отсчетами фона.

Далее, для каждого из четырех кадров была проведена апертурная фотометрия звезд центра скопления М67, стандартные звездные величины которых были взяты из работы [1]. В результате определены следующие трансформационные соотношения:

$$\begin{aligned} V - v &= 13.975 - 0.079(b - v), \\ B - V &= 0.223 + 1.277(b - v), \\ V - R &= 0.173 + 0.940(v - r), \\ R - I &= 0.076 + 0.850(r - i). \end{aligned}$$

Эти соотношения получены при использовании данных из небольшого диапазона звездных величин и показателей цвета ($\Delta V \sim 9.7\text{--}14.1$; $B - V \sim 0.45\text{--}1.25$; $V - R \sim 0.27\text{--}0.71$; $R - I \sim 0.27\text{--}0.51$), поэтому являются в некотором смысле предпочтительными.

Работа выполнена при финансовой поддержке государства в лице Министерства образования и науки Российской Федерации (базовая часть госзадания, РКАААА-А17-117030310283-7).

Библиографические ссылки

1. *Chevalier C., Ilovaisky S. A. Cousins BVRI CCD photometry of stars in the M 67 “dipper asterism” // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser. — 1991. — Vol. 90. — P. 225.*

ФОТОМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЛАКТИК С ВОДЯНЫМИ МАЗЕРАМИ И БЕЗ В РАЗЛИЧНЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ДИАПАЗОНАХ

К. В. Волков, К. И. Смирнова, С. Ю. Парфёнов

Уральский федеральный университет

Исследования мазеров воды в других галактиках играют важную роль в различных областях астрономии. Исследования данных галактик в различных спектральных диапазонах важны для увеличения вероятности их обнаружения. В работе представлено фотометрическое исследование галактик, в которых были обнаружены и не было обнаружено мазеров воды, в инфракрасном (ИК) и ультрафиолетовом (УФ) диапазонах на основе данных из открытых обзоров. Предварительный анализ результатов показал, что на двухцветных диаграммах для УФ- и ИК-цветов и диаграммах поток—показатель цвета для ближнего и дальнего ИК-диапазонов галактики с водяными мазерами распределены заметно более широко по сравнению с галактиками без обнаруженных мазеров. Данные результаты являются основанием для выработки критерия отбора галактик с мазерами воды.

PHOTOMETRIC STUDY OF GALAXIES WITH WATER AND WITHOUT DETECTED WATER MASERS IN DIFFERENT SPECTRAL RANGES

K. V. Volkov, K. I. Smirnova, S. Yu. Parfenov

Ural Federal University

Studies of water masers in other galaxies play an important role in various fields of astronomy, but the probability of detection of these masers is extremely low. Investigations of these galaxies in various spectral ranges are important to improve detection rate for such galaxies. We present the photometric study of galaxies with and without detected water masers in the infrared (IR) and ultraviolet (UV) ranges based on the data from public surveys. A preliminary analysis of the results showed that in the two-color diagrams for UV and IR colors and in the flux-color diagrams for the near and far-IR ranges, galaxies with water masers are distributed much more widely in comparison to galaxies without detected masers. These results serve as the basis for the development of a criterion for the selection of the galaxies with water masers.

Водяные мазеры в других галактиках, наблюдения которых играют важную роль в исследованиях в различных областях астрономии, включая, например, космологию, известны научной общественности уже около 30 лет, но вероятность обнаружения этих мазеров крайне низка ($< 3\%$). Предыдущие исследования [1] показали, что вероятность обнаружения можно повысить, используя данные в различных спектральных диапазонах, доступных в ряде галактических обзоров.

В настоящей работе мы рассматриваем особенности двухцветных диаграмм и диаграмм поток—показатель цвета для галактик с зарегистрированными в них мазерами воды по сравнению с галактиками без обнаруженных мазеров в неисследованных ранее ИК- и УФ-диапазонах. Мы использовали выборку галактик из статьи [2], в которой проводилось исследование особенностей галактик с водяными мазерами в радиоконтинууме. Мы провели апертурную фотометрию для более 40 галактик из этой выборки, используя данные из обзоров KINGFISH, SINGS, GALEX, WISE.

Наши предварительные результаты показывают, что на двухцветных диаграммах для УФ- и ИК-цветов галактики с водяными мазерами распределены заметно более широко по сравнению с галактиками без обнаруженных мазеров, которые находятся преимущественно в нижней части диаграммы. Похожая особенность наблюдается на диаграммах поток—показатель цвета для ближнего и дальнего ИК-диапазонов, где галактики без мазеров сгруппированы в верхней части диаграммы, а галактики с мазерами распределены по всей диаграмме.

Библиографические ссылки

1. Kuo C. Y., Constantin A., Braatz J. A. et al. Enhancing the H₂O Megamaser Detection Rate Using Optical and Mid-infrared Photometry // *Astrophys. J.* — 2018. — Vol. 860, № 2. — P. 169. 1712.04204.
2. Zhang J. S., Henkel C., Guo Q., Wang J. Radio properties of H₂O maser host galaxies // *Astron. Astrophys.* — 2012. — Vol. 538. — P. A152. 1201.2075.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ ПАР ТРАНСНЕПТУНОВЫХ ОБЪЕКТОВ

В. Д. Гусев, Э. Д. Кузнецов
Уральский федеральный университет

На основе анализа метрик Холшевникова выделены пары транснептуновых объектов на близких орбитах. Выполнено численное исследование динамической эволюции пар транснептуновых объектов в прошлое на интервале времени 10 млн лет. Исследовалась возможность сближения транснептуновых объектов в прошлом с целью оценки их возраста и определения механизма формирования пар.

STUDY OF DYNAMICAL EVOLUTION OF PAIRS OF TRANS-NEPTUNIAN OBJECTS

V. D. Gusev, E. D. Kuznetsov
Ural Federal University

Based on the analysis of Kolshevnikov's metrics, pairs of trans-Neptunian objects in close orbits are identified. Performing a numerical study in the field of trans-Neptunian objects in the past over a time interval of 10 million years. A research opportunity in the past made it possible to evaluate their age and determine the mechanism of pair formation.

Транснептуновые объекты — это тела Солнечной системы, которые обращаются по орбитам вокруг Солнца и у которых среднее расстояние до Солнца больше, чем у Нептуна. В настоящее время известно одно семейство транснептуновых объектов — семейство Хаумеа.

На основе анализа значений метрик Холшевникова ρ_2 [1] были выделены пары транснептуновых объектов на близких орбитах ($\rho_2 < 0.15$ а. е.^{1/2}), которые могут иметь общее происхождение.

Была исследована динамическая эволюция на интервале времени 10 млн лет. Численное моделирование выполнялось с помощью программы Orbit9, входящей в комплекс OrbFit. Учитывались возмущения от восьми больших планет, карликовой планеты Плутон, сжатия

Пары транснептуновых объектов, которые могут иметь общее происхождение

№	Астероиды		$\rho_2, (\text{a. e.})^{1/2}$
1	(500839) 2013 GW137	2015 GZ58	0.06
2	2004 PU117	2015 VY170	0.08
3	2004 HK79	2015 GA57	0.12
4	2001 OG109	2015 GS56	0.12
5	2002 PV170	2013 SX100	0.13
6	2003 QF91	2015 VC173	0.13
7	2001 OK108	2013 SV100	0.13
8	(275809) 2001 QY297	2013 UR22	0.15
9	(469705) 2005 EF298	2015 VZ171	0.15

Солнца и релятивистские эффекты. Для пар астероидов 2004 PU117 и 2015 VY170, 2003 QF91 и 2015 VC173 метрики уменьшаются, но интервал в 10 млн лет недостаточен для того, чтобы обнаружить тесное сближение объектов.

Для анализа условий сближения были вычислены вторые космические скорости и вероятные радиусы сфер Хилла астероидов. Массы и размеры астероидов оценивались в предположении, что значения плотности лежат в интервале от 0.92 до 2.00 г/см³, значения геометрического альбеда — от 0.015 до 0.408. В случае если пара образовалась в результате разрушения родительского тела, относительные расстояния во время сближения должны быть одного порядка с радиусом сферы Хилла, а относительная скорость — порядка второй космической.

На рассматриваемом интервале времени не выявлены тесные сближения транснептуновых объектов, движущихся по близким орбитам, необходимо увеличивать интервал интегрирования до нескольких сотен миллионов лет.

Библиографические ссылки

1. *Kholshevnikov K. V., Kokhirova G. I., Babadzhanyan P. B., Khamroev U. H.* Metrics in the space of orbits and their application to searching for celestial objects of common origin // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2016. — Vol. 25. — P. 2275–2283.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЗРАСТОВ РАССЕЯННЫХ ЗВЕЗДНЫХ СКОПЛЕНИЙ ПО ДАННЫМ GAIA DR2

Е. О. Дедов

Уральский федеральный университет

Для определения возрастов рассеянных звездных скоплений по данным GAIA DR2 была написана программа, реализующая метод совмещения фотометрической диаграммы скопления с набором изохрон. В работе представлены первые результаты работы программы.

AGE DETERMINATION OF OPEN CLUSTERS WITH GAIA DR2

E. O. Dedov

Ural Federal University

To fulfill the determination of open clusters ages, there was written a program, which applies isochrone fitting to color-magnitude diagram. This work contains the first results of this program's work.

В качестве входных данных программе передаются данные о звездных величинах, показателях цвета и тригонометрических параллаксах звезд—членов скопления, а также набор изохрон [1]. Введение параллаксов позволяет вычислить модуль расстояния:

$$(m - M) = -5 + 5 \cdot \log r - A_g, \quad (1)$$

где m — видимая звездная величина; M — абсолютная звездная величина; r — расстояние до звезды (в парсеках); A_g — величина межзвездного поглощения.

Затем может быть осуществлен переход к абсолютным звездным величинам:

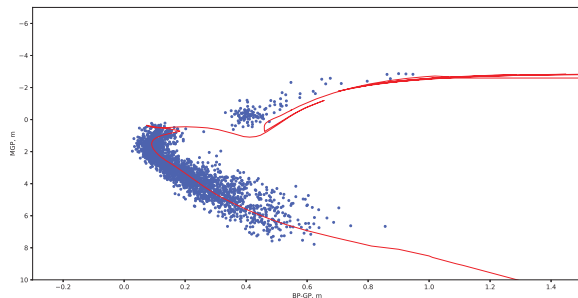
$$M = m - (m - M)_V - A_g, \quad (2)$$

где $(m - M)_V$ — видимый модуль расстояния.

Поскольку величина межзвездного поглощения связана с избытком цвета соотношением $A_g = 4.32 \cdot E(B - G)$ (А. В. Локтин и

М. Э. Попова, частное сообщение), совмещение фотометрической диаграммы с изохроной, помимо возраста, даст избыток цвета.

Цикл совмещения построен следующим образом: для всех звезд—членов скопления вычисляется квадрат разности их отклонения от изохроны по показателю цвета, квадраты отклонений суммируются. При суммировании вводится весовая функция, призванная учесть, что поведение звезд, ушедших с главной последовательности, либо не дошедших до нее, не точно описывается изохроной из-за сложности происходящих в таких звездах процессов. Затем фотометрическая диаграмма смещается по двум осям с шагом, определяемым выражением $A_g = 4.32 \cdot E(B - G)$. Шаг вычисления суммы квадратов и смещения повторяется до тех пор, пока не будет достигнут минимум отклонения звезд от изохроны. Пример проведенного совмещения представлен на рисунке.



Совмещение фотометрической диаграммы скопления NGC7789 с изохроной возрастом $\log T = 9.00$

Для более точного определения возраста через суммы квадратов отклонений проводится полином, минимум которого и указывает на искомый возраст скопления. Так, для скопления NGC7789 получены следующие результаты: $\log T = 8.94$, $E(BP - GP) = 0.28$, что согласуется с другими оценками [2].

Библиографические ссылки

1. *Bressan A. et al.* PARSEC: stellar tracks and isochrones with the PAdova and TRieste Stellar Evolution Code.
2. *Loktin A. V., Gerasimenko T. P., Malysheva L. K.* The catalogue of open cluster parameters-second version // Astron. Astroph. Trans. — 2001.

**ДИНАМИЧЕСКАЯ И ТЕПЛОВАЯ ЭВОЛЮЦИЯ
АСТЕРОИДОВ, СБЛИЖАЮЩИХСЯ С ЗЕМЛЕЙ,
НА ОРБИТАХ С БОЛЬШИМИ
ЭКСЦЕНТРИСИТЕТАМИ**

И. А. Малютин, Э. Д. Кузнецов

Уральский федеральный университет

Исследована динамическая и тепловая эволюция астероида (3200) Phaethon. Получено решение задачи о прогреве поверхности астероида. Построено численное решение методом конечных элементов. Полученные результаты представляют интерес при исследовании поверхности и внутреннего строения астероида.

**DYNAMIC AND THERMAL EVOLUTION
OF NEAR-EARTH ASTEROIDS IN ORBITS WITH HIGH
ECCENTRICITIES**

I. A. Malyutin, E. D. Kuznetsov

Ural Federal University

In this work we considered dynamic and thermal evolution of the near-Earth asteroid (3200) Phaethon. We showed solution to problem of heating the surface of an asteroid and made numerical solution by finite element method. The results will be useful for researching the surface and internal structure of an asteroid.

Астероид (3200) Phaethon был открыт обсерваторией IRAS (InfraRed Astronomical Satellite) в 1983 г. и относится к астероидам, сближающимся с Землей (АСЗ). Астероид движется по очень вытянутой орбите и в перигеуме подходит к Солнцу на расстояние 0.14 а. е. Астероид (3200) Phaethon считается родительским телом метеоритного потока Геминиды, тогда как большинство метеорных потоков порождены кометами. В 2022 г. Японское агентство аэрокосмических исследований (JAXA, Japan Aerospace Exploration Agency) планирует запуск космического аппарата DESTINY⁺ для исследования астероида (3200) Phaethon. Подготовка к реализации научной программы этого проекта предполагает изучение особенностей прогрева астероида вследствие неоднократного прохождения его вблизи

Солнца, составление карты распределения поверхностной температуры. В настоящей работе построена теплофизическая модель (3200) Phaethon. Осуществлено численное решение уравнения теплопроводности (1) для поверхности астероида методом конечных элементов:

$$\frac{\partial U(\mathbf{r}, t)}{\partial t} - \alpha \Delta U(\mathbf{r}, t) = f(\mathbf{r}, t), \quad (1)$$

где $U(\mathbf{r}, t)$ – искомая функция температуры; α – коэффициент теплопроводности; $f(\mathbf{r}, t)$ – функция тепловых источников, описывающая передачу тепла телом; t – время.

Для решения уравнения теплопроводности задаются смешанные граничные условия (или граничные условия 3-го рода). Указываются начальная температура $U(0, 0) = T$ и тепловой поток от Солнца $\frac{\partial U}{\partial \mathbf{r}}$ на поверхности астероида. Полученные результаты представляют интерес при исследовании поверхности и внутреннего строения астероида.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПОЯВЛЕНИЯ АНОМАЛЬНО ЯРКИХ МЕЗОСФЕРНЫХ ОБЛАЧНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ ОТ МАСШТАБНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ

А. С. Найдёнова

Уральский федеральный университет

Феномен серебристых облаков (СО), облаков, образующихся на высотах 70—95 км в мезосфере, до сих пор остается не до конца изученным. На сегодняшний день существует несколько гипотез их образования. Цель данной работы — проверка некоторых гипотез образования серебристых облаков (извержение вулканов, максимум метеорных потоков). Из вулканов были проанализированы Эйяфьядлайёкюдль (Исландия) и вулканы Камчатки. Также были рассмотрены метеорные потоки Квадрантиды, Лириды, Ариетиды и их максимумы активности. Выявлено соответствие максимума метеорных потоков появлению локальных увеличений количества и яркости этих образований.

RESEARCH OF DEPENDENCE OF APPEARANCE OF ABNORMALLY BRIGHT MESOSPHERIC CLOUDS STRUCTURES ON LARGE-SCALE SPACE PHENOMENA

A. S. Naidenova

Ural Federal University

The phenomenon of noctilucent clouds (NC), i. e. clouds that form at an altitude of 70—95 km in the mesosphere, is still not fully understood. To date, there are several hypotheses explaining the formation of these clouds. The goal of this work was to test some hypotheses of the formation of noctilucent cloud, namely, volcanic eruptions and maxima of meteor showers. I analyzed Eyyafyadlayokyudl (Iceland) volcano and the volcanoes of Kamchatka. The meteor showers Quadrantids, Lyrids, Arietids and their activity maxima were also considered. The correspondence between the maxima of meteor showers and local enhancements in the number and brightness of noctilucent clouds is revealed.

Были рассмотрены некоторые события: извержения вулкана Эйяфьядлайёкюдль (Исландия), вулканы Камчатки; максимумы метеорных потоков: Квадрантиды, Лириды, Ариетиды, с которыми я хотела связать появление аномально ярких СО, но столкнулась с проблемой недостатка данных и отсутствия наблюдений. Сложность исследования мезосферных облаков в южном полушарии заключается и в географическом положении материков (на нужной широте почти нет суши, с которой могло бы наблюдаться явление), поэтому наблюдения осуществимы только со спутников LIDAR. Для того чтобы увидеть СО, необходимо совмещение многих факторов: чистое небо, наличие навигационных сумерек, угол погружения Солнца под горизонт $6\text{--}12^\circ$. Вулканический пепел иногда относит на регионы, в которых в период наблюдения СО наблюдаются полярный день или белые ночи, а высота выбросов пепла может не достигать необходимой высоты или быть незначительной концентрации. Также наблюдались метеорологические условия, которые препятствовали выполнению условия «ясное небо» для наблюдения СО. Поэтому мне не удалось проследить связь между извержениями исследуемых вулканов и появлением СО. Для исследования связи метеорных потоков с появлением СО я использовала информацию о потоках и наблюдении СО, взятую из соответствующих архивов [1] (см. таблицу). В результате были найдены локальные увеличения количества и яркости этих образований.

АРХИВ НАБЛЮДЕНИЙ СЕРЕБРИСТЫХ ОБЛАКОВ

Отчеты о наблюдениях в период с '2011-06-01 UT 02 00' по '2011-06-12 UT 02 00' Показать

№	Наблюдатель	UT начало наблюдения	UT конец наблюдения	Кол. облаков	Сортип облаков	Яркость	Инт. Образ.	Аз.	Вс.с.	Шир.	Долг.	Обл.
107	Цириков Егор	2011-06-09 21:15:00	2011-06-09 22:15:00	70%	I; IIa; IIb; IIIa;	3/5	5/10	0°	75°	54.58	39.96	10%

Отчет о наблюдениях СО в период (01.06—12.06 за 2011 г.) активности метеорного потока Ариетиды

Автор выражает благодарность К. И. Смирновой и О. С. Угольникову.

Библиографические ссылки

1. Архив наблюдений серебристых облаков. — <http://meteoweb.ru/astro/nlc/reports.php>. (accessed: 22.05.2019).

Научные сообщения



WASP-12 b И WASP-4 b: ПЛАНЕТЫ, СВАЛИВАЮЩИЕСЯ НА СВОЮ ЗВЕЗДУ?

**Р. В. Балуюв^{1,2}, Е. Н. Соков^{1,2}, И. А. Сокова^{1,2},
В. Ш. Шайдулин² и команда EXPANSION**

¹ Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН,

² Санкт-Петербургский государственный университет

Представлены результаты однородной обработки более тысячи кривых блеска экзопланетных прохождений для 17 экзопланет.

WASP-12 b AND WASP-4 b: PLANETS FALLING ONTO THE HOST STAR?

**R. V. Baluev^{1,2}, E. N. Sokov^{1,2}, I. A. Sokova^{1,2},
V. Sh. Shaidulin², and EXPANSION team**

¹ Central Astronomical Observatory at Pulkovo of RAS, ² Saint

Petersburg State University

We present results of a homogeneous analysis of more than thousand transit lightcurves of 17 exoplanets.

Однородным способом нами обработано $\sim 3.2 \times 10^5$ фотометрических измерений для ~ 1100 кривых блеска экзопланетных прохождений для 17 экзопланет. Фотометрические данные покрывают 16 лет (2004–2019) и включают любительские и профессиональные наблюдения. Старые архивные кривые блеска переобработаны с использованием современных экзопланетных параметров и эмпирически исправленных моделей эффекта потемнения к краю. Также проводился самосогласованный анализ прохождений и лучевых скоростей для 13 объектов.

Мы подтверждаем наличие значимого нелинейного TTV-тренда у WASP-12 без существенных поправок к его величине. Однако доплеровские данные обнаружили лучевое ускорение звезды около (-7.5 ± 2.2) м/с/год, что указывает на присутствие в системе других темных спутников помимо известной планеты b. Это предполагает,

© Балуюв Р. В., Соков Е. Н., Сокова И. А.,
Шайдулин В. Ш. и команда EXPANSION, 2020

что около 10 % наблюдаемого TTV-сигнала возникло по причине эффекта конечности скорости света и гравитационного смещения центра масс звезды и внутренней планеты под действием невидимых тел (эффект Рёмера). Остальная часть тренда по-прежнему объясняется приливным взаимодействием планеты b со звездой.

Для WASP-4 аналогичный TTV тренд, ранее заподозренный по наблюдениям КА TESS, получился несогласованным и модельно зависимым. Он не подтверждается по результатам нашей однородной обработки, включавшей в том числе 10 новых кривых блеска, полученных наземной сетью телескопов EXPANSION в 2018 г. одновременно с TESS. Даже если TTV тренд сам по себе существует, его величину и физическую природу нельзя определить надежно. Доплеровские данные не в состоянии исключить возможность эффекта Рёмера от потенциальных невидимых спутников.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-72-10023.

БЫСТРЫЙ АЛГОРИТМ ВЫЧИСЛЕНИЯ ПАРАМЕТРА MOID С КОНТРОЛЕМ ОШИБОК

Р. В. Балуюв^{1,2}, Д. В. Микрюков¹

¹*Санкт-Петербургский государственный университет,* ²*Главная
(Пулковская) астрономическая обсерватория РАН*

Представлен новый быстрый алгоритм вычисления параметра
MOID (расстояния между орбитами).

FAST MOID COMPUTATION ALGORITHM WITH ERROR CONTROL

R. V. Baluev^{1,2}, D. V. Mikryukov¹

¹*Saint Petersburg State University,* ²*Central Astronomical Observatory
at Pulkovo of RAS*

We present a new fast algorithm to compute the minimum orbital
intersection distance (MOID).

Разработан эффективный алгоритм вычисления межорбитально-го параметра расстояния MOID, т. е. глобального минимума расстояния между двумя точками, лежащими на соответствующих кеплеровых эллипсах. Задача решается путем нахождения всех стационарных точек функции расстояния, для чего находятся корни алгебраического многочлена 16-й степени. Алгоритм следит за величиной численных ошибок, получаемых в результате вычислений, а также тщательно обходит почти вырожденные случаи, в том числе практические случаи с почти круговыми и почти компланарными орбитами. Бенчмарк-тесты подтвердили, что алгоритм обладает высокой надежностью и точностью, а также то, что, несмотря на дополнительные расходы времени, связанные с контролем ошибок, он претендует на звание одного из наиболее быстрых методов вычисления параметра MOID на настоящий момент. Таким образом, его можно рекомендовать для обработки больших каталогов. Мы также представляем новую простую аналитическую нижнюю границу для параметра MOID, которую тоже можно использовать для дальнейшего ускорения обработки.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 18-12-00050.

© Балуюв Р. В., Микрюков Д. В., 2020

ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗ 2D-РАСПРЕДЕЛЕНИЙ АСТЕРОИДОВ ГЛАВНОГО ПОЯСА И ЗВЕЗДНОГО НАСЕЛЕНИЯ ГАЛАКТИКИ

Р. В. Балувев^{1,2}, Е. И. Родионов¹, В. Ш. Шайдулин¹,
А. В. Веселова¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет, ²Главная
(Пулковская) астрономическая обсерватория РАН

В работе представляется программный комплекс обработки двумерных функций распределения статистических выборок на основе нового самосогласованного метода вейвлет-анализа.

WAVELET ANALYSIS OF 2D DISTRIBUTIONS IN THE MAIN BELT AND MILKY WAY POPULATIONS

R. V. Baluev^{1,2}, E. I. Rodionov¹, V. Sh. Shaidulin¹,
A. V. Veselova¹

¹Saint Petersburg State University, ²Central Astronomical Observatory
at Pulkovo of RAS

We present a self-consistent mathematical and algorithmic framework to perform the continuous wavelet analysis of two-dimensional statistical distributions.

Производится поиск статистически значимых структур двумерного распределения, связанных с поведением сглаженного лапласиана плотности вероятности. Эти структуры могут включать локальные уплотнения (кластеры объектов) или разрежения (провалы в распределении). Алгоритм строит наиболее экономную модель функции плотности, содержащую только значимые структуры. Метод основан на новых оптимальных в данной задаче вейвлетах и оптимальных восстанавливающих ядрах, а также использует ранее неизвестную аналитическую аппроксимацию для значимости извлекаемых структур. Метод апробирован на статистических распределениях различных астрономических объектов: астероидов Главного пояса (орбитальные параметры a , e , $\sin i$) и звездного населения Галактики по данным GAIA DR2 (компоненты скорости U , V , W). Для этих ансамблей проведен поиск всех статистически значимых

семейств по каждой из трех возможных пар параметров, а затем осуществлено их взаимоотожествление в соответствующем трехмерном пространстве.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 17-02-00542 А.

УСКОРЕНИЕ ЧИСЛЕННОГО ИНТЕГРИРОВАНИЯ УРАВНЕНИЙ ДВИЖЕНИЯ АСТЕРОИДОВ И ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

И. А. Баляев

Санкт-Петербургский государственный университет

Создана программа R^0 для быстрого вычисления тесных сближений с телами Солнечной системы большого количества виртуальных астероидов. Представлены первые результаты.

ACCELERATION OF NUMERICAL INTEGRATION OF ASTEROID MOTION EQUATIONS AND FIRST RESULTS

I. A. Balyaev

Saint Petersburg State University

Program R^0 created for quick calculation close approaches of large number of virtual asteroids with Solar System bodies. The first results are presented.

В настоящее время каждый год открывается около 2000 околоземных астероидов. Поиск и изучение возможных соударений требуют значительного объема вычислений уже для одного астероида. Разработанный на кафедре небесной механики СПбГУ программный комплекс v19 позволяет находить множество ведущих к соударению областей начальных данных (щелей) путем одномерного варьирования. С использованием вычислительного кластера СПбГУ расчет занимает от нескольких часов до нескольких суток в зависимости от величины шага сканирования и количества сближений с Землей. Переход к многомерному варьированию и включение в рассмотрение большого числа астероидов потребовали бы колоссальных затрат вычислительных ресурсов.

Для изучения многомерных характеристик щелей было решено создать с нуля новую программу, использующую метод Гаусса—Эверхарта и эфемериды DE430. Программа R^0 предназначена для вычисления траекторий и параметров тесных сближений с планетами, Солнцем и Луной большого числа виртуальных астероидов.

Создание с нуля позволило произвести существенную оптимизацию. Тестирование показало ускорение в 10 раз и более по сравнению с v19. В дальнейшем R⁰ станет основой для нового программного комплекса.

Для примера выбрано несколько задач, требующих расчета траекторий большого количества виртуальных астероидов. Среди них подробное сканирование некоторых областей начальных данных и метод Монте-Карло.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19—32—90149.

ИК-ПЕРЕМЕННОСТЬ В ОБЛАСТИ ИСТЕЧЕНИЙ ПРОТОЗВЕЗДЫ IRAS 20126+4104

А. П. Бисярина¹, А. М. Соболев¹, В. Stecklum²

¹*Астрономическая обсерватория УрФУ, ²Thüringer
Landessternwarte Tautenburg*

Обнаружена значительная переменность инфракрасного излучения в области истечений массивной протозвезды IRAS 20126+4104. Анализ выполнен на основе данных архивных наблюдений источника, прежде всего в фильтре К.

IR-VARIABILITY OF THE JET REGION IN THE VICINITY OF IRAS 20126+4104

A. P. Bisyarina¹, A. M. Sobolev¹, B. Stecklum²

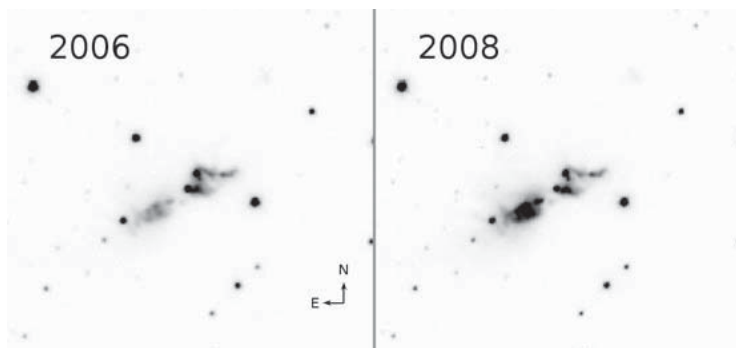
¹*Astronomical Observatory of UrFU, ²Thüringer Landessternwarte
Tautenburg*

We detected a significant variability of the infrared emission in the region of the jet of the massive protostar IRAS 20126+4101. The analysis was performing on the basis of archival observational data of the object, particularly the K-band data.

Молодой звездный объект IRAS 20126+4104 — это массивный объект с широко изученным диском, прецессирующими истечениями и потоками. В частности, в работе [1] получены изображения области истечений в фильтрах К и H₂ с высоким пространственным разрешением. В пределах тысячи астрономических единиц вблизи объекта наблюдается переменное мазерное излучение в линиях метанола 6.7 ГГц и воды 22 ГГц [2]. Авторы работы по данным интерферометрических наблюдений, проведенных в течение нескольких эпох, показали, что излучение метанольного мазера образовано в диске вокруг объекта, а водяного мазера — в истечениях.

Цель настоящего исследования — поиск переменности в окрестности объекта на основе архивных данных. В ближнем инфракрасном диапазоне в фильтре К обнаружена существенная переменность излучения, прослеживающего две области, образованные биполярным

истечением (см. рисунок). Примечательно, что переменность излучения в этих областях происходит по-разному. Сильнее изменяется яркость излучения юго-восточной части (т. е. той, что расположена за протозвездой, дальше от наблюдателя). При этом, например, на изображении, полученном в 2003 г., когда наблюдалось максимальное излучение этой области, противоположная часть, наоборот, заметно потускнела.



Окрестности источника IRAS 20126+4104 в фильтре К по данным архива UKIDSS. Изображения представлены в одной шкале яркостей

Исследование объекта в фильтре К выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта 18–32–00314. Интерпретация данных и исследование в других спектральных диапазонах, включая мазерное излучение, выполнено при финансовой поддержке РНФ (проект 18–12–00193).

Библиографические ссылки

1. *Cesaroni R., Massi F., Arcidiacono C. et al.* A close-up view of bipolar jet: Sub-arcsecond near-infrared imaging of the high-mass protostar IRAS 20126+4104 // *Astron. Astrophys.* — 2013. — Vol. 549.
2. *Moscadelli L., Cesaroni R., Rioja M. J. et al.* Methanol and water masers in IRAS 20126+4104: the distance, the disk, and the jet // *Astron. Astrophys.* — 2011. — Vol. 526.

ОРБИТАЛЬНАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ОБЪЕКТОВ, ДВИЖУЩИХСЯ В ОКРЕСТНОСТИ РЕЗОНАНСА 1 : 4 С ВРАЩЕНИЕМ ЗЕМЛИ

Е. В. Блинкова, И. В. Томилова

*Национальный исследовательский Томский государственный
университет*

В работе представлены результаты исследования динамической структуры околоземного орбитального пространства в области резонанса 1 : 4 со скоростью вращения Земли. В результате численного моделирования выявлены зоны действия в ней пяти компонент орбитального резонанса и апсидально-нодальных вековых резонансов низких порядков.

ORBITAL EVOLUTION OF OBJECTS MOVING IN THE NEIGHBORHOOD OF THE RESONANCE 1 : 4 WITH ROTATION OF THE EARTH

E. V. Blinkova, I. V. Tomilova

National Research Tomsk State University

The paper presents the results of studies of the dynamic structure of the near-earth orbital space in the region of resonance 1 : 4 with the speed of rotation of the Earth. As a result, the actions zones of five-component orbital resonance and apsidal-nodal secular resonances of low orders were found.

Целью данной работы является детальное исследование динамической структуры области резонанса 1 : 4 со скоростью вращения Земли и особенностей долговременной орбитальной динамики объектов, движущихся в этой области. Исследование осуществляется путем численного моделирования.

Для реализации поставленной цели решены следующие задачи:

- исследована динамическая структура орбитального пространства с использованием быстрой ляпуновской характеристики MEGNO и построена соответствующая динамическая карта области;
- произведен анализ резонансных возмущений, действующих на движение объектов, населяющих рассматриваемую орбитальную область;

– выявлены особенности динамической эволюции орбит под действием резонансов.

Численное моделирование движения объектов осуществлялось на кластере «СКИФ Cyberia» НИ ТГУ при помощи усовершенствованного программного комплекса «Численная модель движения систем ИСЗ». В процессе моделирования учитывались возмущения от гармоник геопотенциала до 10-го порядка и степени, а также возмущения от Луны и Солнца.

Численный эксперимент осуществлялся в диапазоне наклонений от 0 до 180° и в диапазоне больших полуосей от 16 720 до 16 750 км для области резонанса 1 : 4.

Показано, что в области действуют пять компонент орбитального резонанса и 20 вековых апсидально-нодальных резонансов низких порядков. Перечень действующих вековых резонансов дан в таблице.

Типы резонансных соотношений, действующих в области

№	Тип резонансного соотношения	№	Тип резонансного соотношения
1	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{S,L}) + \dot{\omega} - \dot{\omega}'_{S,L}$	11	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{S,L}) + 2\dot{\omega}$
2	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{S,L}) - \dot{\omega} + \dot{\omega}'_{S,L}$	12	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{S,L}) - 2\dot{\omega}$
3	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{S,L}) + \dot{\omega} + \dot{\omega}'_{S,L}$	13	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{S,L}) + \dot{\omega}'_{S,L}$
4	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{S,L}) - \dot{\omega} - \dot{\omega}'_{S,L}$	14	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{S,L}) - \dot{\omega}'_{S,L}$
5	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{S,L}) + 2\dot{\omega} - 2\dot{\omega}'_{S,L}$	15	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{S,L}) + 2\dot{\omega}'_{S,L}$
6	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{S,L}) - 2\dot{\omega} + 2\dot{\omega}'_{S,L}$	16	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{S,L}) - 2\dot{\omega}'_{S,L}$
7	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{S,L}) + 2\dot{\omega} + 2\dot{\omega}'_{S,L}$	17	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{S,L})$
8	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{S,L}) - 2\dot{\omega} - 2\dot{\omega}'_{S,L}$	18	$\dot{\omega} - \dot{\omega}'_{S,L}$
9	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{S,L}) + \dot{\omega}$	19	$\dot{\omega} + \dot{\omega}'_{S,L}$
10	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{S,L}) - \dot{\omega}$	20	$\dot{\omega}$

Область исследования характеризуется наличием участков пространства, где действуют резонансы различных типов, что в ряде случаев приводит к падению объектов на Землю.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант 18–32–00735 мол_а.

МГД-МОДЕЛЬ АККРЕЦИОННЫХ ДИСКОВ МОЛОДЫХ ЗВЕЗД

Р. Ф. Вахитов¹, А. Е. Дудоров^{1,2}, С. А. Хайбрахманов^{1,2}

¹*Челябинский государственный университет,*

²*Уральский федеральный университет*

Исследуется динамика аккреционных дисков молодых звезд с остаточным крупномасштабным магнитным полем. Рассматривается влияние магнитного поля на скорость вращения вещества в диске и определяется степень отклонения от кеплеровского вращения. Обсуждаются наблюдаемые проявления аккреционных дисков молодых звезд с динамически сильным магнитным полем.

MHD MODEL OF ACCRETIONS DISKS AROUND YOUNG STARS

R. F. Vakhitov¹, A. E. Dudorov^{1,2}, S. A. Khaibrakhmanov^{1,2}

¹*Chelyabinsk State University*

²*Ural Federal University*

We investigate the dynamics of the accretion disks of young stars with fossil large-scale magnetic field. The influence of magnetic field on rotational speed of matter in the accretion disk is studied, and deviation degree from Keplerian rotation is determined. Observational appearance of the accretion disks with strong magnetic field is discussed.

В данной работе исследуется динамика аккреционных дисков молодых звезд с остаточным крупномасштабным магнитным полем. В качестве базовой используется кинематическая МГД-модель аккреционных дисков Дудорова и Хайбрахманова [1–3], разработанная на основе стандартной модели Шакуры и Сюняева [4]. В модели, помимо основных уравнений магнитной газодинамики (МГД), решаются уравнения ионизации и индукции. Магнитное поле определяется с учетом омической и магнитной амбиполярной диффузии, плаваемости и эффекта Холла. Степень ионизации рассчитывается с учетом ударной и тепловой ионизации, лучистых рекомбинаций, диссоциативных рекомбинаций и рекомбинаций на пыли. Уравнения базовой модели записываются с учетом электромагнитной силы в уравнении

движения и джоулева нагрева в уравнении энергии. Дудоров и Хайбрахманов [5] исследовали влияние диссипативных МГД-эффектов на тепловую структуру аккреционных дисков. Исследуется влияние магнитного поля на скорость вращения вещества в диске и определяется степень отклонения от кеплеровского вращения. Обсуждаются наблюдаемые проявления аккреционных дисков молодых звезд с динамически сильным магнитным полем.

Работа С. А. Хайбрахманова выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 19-72-10012), работа А. Е. Дудорова выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 18-02-01067).

Библиографические ссылки

1. Дудоров А. Е., Хайбрахманов С. А. Кинематическая МГД-модель аккреционных дисков молодых звезд. Аналитическое решение // Вестн. Челяб. гос. ун-та. — 2013. — № 9 (300). — Р. 27–39.
2. Dudorov A. E., Khaibrakhmanov S. A. Fossil magnetic field of accretion disks of young stars // Astrophysics and Space Science. — 2014. — Vol. 352, № 1. — Р. 103–121.
3. Дудоров А. Е., Хайбрахманов С. А. Кинематическая МГД-модель аккреционных дисков молодых звезд. Численные расчеты // Вестн. Челяб. гос. ун-та. — 2013. — № 9 (300). — Р. 40–52.
4. Shakura N. I., Sunyaev R. A. Black holes in binary systems. Observational appearance // Astronomy and Astrophysics. — 1973. — Vol. 24. — Р. 337–355.
5. Khaibrakhmanov S. A., Dudorov A. E. Influence of Ohmic and ambipolar heating on thermal structure of accretion discs // Magnetohydrodynamics. — 2019. — Vol. 55, № 1–2. — Р. 65–72. 1812.10634.

МАССИВНАЯ ЗАТМЕННАЯ ПЕРЕМЕННАЯ UU CAS — В СВЕТЕ НОВЫХ ДАННЫХ

С. Ю. Горда, Т. С. Полушина

*Коуровская астрономическая обсерватория Уральского
федерального университета*

На основе новых спектральных и фотометрических наблюдений затменно-двойной UU Cas, выполненных на телескопах Коуровской обсерватории УрФУ в 2007—2018 гг., впервые построена кривая лучевых скоростей вторичного компонента. Найденные значения масс обоих компонентов оказались меньше, чем считалось ранее, а значение их отношения — обратным ранее найденному из решений кривых блеска. По наблюдаемой эмиссии водородных линий и меньшей потере блеска при затмении вторичного, более массивного компонента сделан вывод, подтверждающий заключения более ранних спектральных исследований UU Cas, что в системе идет обмен масс с образованием диска вокруг вторичного компонента.

MASSIVE ECLIPSED VARIABLE UU CAS — IN THE LIGHT OF NEW DATA

S. Yu. Gorda, T. S. Polushina

Kourovka Astronomical Observatory of Ural Federal University

Based on new spectral and photometric observations of the eclipsing binary UU Cas made on the telescopes of Kourovskaya observatory of the Ural Federal University in 2007—2018, the radial velocities of the secondary component were measured for the first time. Mass values of both components are found to be smaller than it was believed earlier, and their ratio is inverse to the previously reported from the solutions of light curves. By the observed emission of hydrogen lines and by the lower brightness loss of the secondary and more massive component during eclipse it was concluded that the mass exchange process in the system proceeds with the formation of a disk around the secondary component. This confirms conclusions of the earlier UU Cas spectral studies.

Затменная переменная UU Cas ($V = 10.4^m - 10.8^m$, $P = 8.51929^d$) была известна как тесная двойная система (ТДС) с очень массивными, порядка $30 M_\odot$ и более, компонентами. Эти данные были основаны на результатах фотографической спектроскопии и фотоэлектрической фотометрии. На кривых блеска отмечались значимые до 0.08^m отклонения блеска от средних значений. Это объяснялось наличием газовой составляющей в системе (общая оболочка, газовые струи), образующейся вследствие заполнения одним или двумя компонентами своих полостей Роша.

На основе новых спектральных исследований, выполненных на 1.2 м телескопе Коуровской обсерватории УрФУ, оснащённом оптоволоконным эшелле-спектрометром, впервые были получены кривые лучевых скоростей обоих компонентов UU Cas [1]. Значения масс компонентов оказались почти в два раза меньше, чем считалось ранее ($M_1 = 9.5 M_\odot$, $M_2 = 17.7 M_\odot$), а отношение масс — обратным тому, что определялось из решений кривых блеска. Были получены доказательства наличия истечения вещества с менее массивного главного компонента, заполняющего полость Роша, через точку L_1 на вторичный, более массивный и горячий компонент с образованием вокруг него газового диска, частично поглощающего излучение.

Новые BVR-кривые блеска UU Cas, полученные в Коуровской обсерватории в 2007—2015 гг. на телескопе АЗТ-3 с ПЗС-приемником, показали значительный разброс данных, полученных в различные ночи, в то время как данные отдельных ночей имели разброс значений не более $\pm 0.01^m$. По данным только кривых блеска не удалось определить, какое значение отношения масс компонентов соответствует действительности, так как теоретические кривые блеска, построенные в предположении двухкомпонентной модели Роша, при $M_1 > M_2$ и $M_1 < M_2$ одинаково хорошо аппроксимировали наблюдаемые кривые блеска. Однозначный ответ определяется данными спектральных наблюдений.

Работа выполнена при финансовой поддержке государства в лице Министерства образования и науки Российской Федерации (базовая часть госзадания, РКАААА-А17-117030310283-7).

Библиографические ссылки

1. Gorda S. Yu. Eclipsing binary UU Cas: Radial-velocity curves // Astrophysical Bulletin. — 2017. — Vol. 72, № 3. — P. 321—329.

МЕЖЗВЕЗДНЫЕ ПЛАНЕТЫ И КОМЕТЫ: МЕХАНИЗМЫ ОБРАЗОВАНИЯ, СПОСОБЫ ОБНАРУЖЕНИЯ, СТАТИСТИКА

Г. Н. Дремова¹, В. В. Дремов¹, А. В. Тутуков²

¹*Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский
научно-исследовательский институт технической физики,*

²*Институт астрономии Российской академии наук*

Рассмотрены механизмы образования и обнаружения межзвездных планет и комет.

INTERSTELLAR PLANETS AND COMETS: ORIGIN MECHANISMS, DISCOVERY WAYS, AND STATISTICS

G. N. Dryomova¹, V. V. Dryomov¹, A. V. Tutukov²

¹*Russian Federal Nuclear Centre — Institute of Technical Physics,*

²*Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences*

We consider mechanisms of origin and detection of interstellar planets and comets.

Подобно тому как летопись Солнечной системы записана в ее планетах, «лун» и астероидах, точно так же история нашей Галактики «отпечатана» в ее звездах. Результаты наблюдений миссии «Кеплер» подняли теоретическую оценку экзопланет в нашей Галактике, предсказанную Тутуковым [1], с 40 до 100 %: практически каждая звезда в Галактике имеет планетную систему. Согласно современной теории образования планет многие из них возникают на неустойчивых орбитах, поэтому могут быть выброшены за пределы звездной родительской системы. Такие же выводы справедливы для малых космических тел, осколков строительного планетного материала, включающих астероиды и кометы.

Возможности прямого численного моделирования первичного планетного «хаоса» в модельных звездных системах, являющихся прототипами Солнечной системы, позволяют искать границы неустойчивых орбит планет и их «лун», а также оценить спектр скоростей выброшенных объектов. Такое исследование затрагивает

ряд аспектов. Во-первых, астероиды — хорошо наблюдаемые компоненты Солнечной системы, организованные в своем движении в пояс Койпера и засвидетельствовавшие процесс образования Солнца и протопланетного диска. Во-вторых, облако Оорта — источник долгопериодических комет, отражающих бурную эпоху сборки Солнечной системы и выбросов из нее, которым не хватило скорости до свободного полета в межзвездное пространство. И, в-третьих, собственно межзвездное пространство, которое, в рамках изложенных представлений, должно изобиловать планетными «осколками».

Сегодня мы уже имеем несколько наблюдательных подтверждений. В 2017 г. на основе данных телескопа PanSTARRS был обнаружен первый внесолнечный астероид Оумуамуа [2], еще через год на снимках, сделанных с помощью телескопов Гершель и Gemini North, — межзвездная комета C/2019 Q4 (Borisov) [3]. Согласно теоретическим оценкам и результатам численного моделирования вся Галактика погружена в поле свободных планет и астероидов, число которых несоразмерно больше звездной популяции, — вывод, который позволяет добавить в состав Галактики наряду со звездами, газовыми облаками и пылью планетный компонент.

Библиографические ссылки

1. *Тютюшков А. В.* Звезды и планетные системы // Астрон. журн. — 1987. — Т. 64. — С. 1264—1268.
2. *Trilling D. E., Robinson T., Roegge A. et al.* Implications for Planetary System Formation from Interstellar Object 1I/2017 U1 ("Oumuamua") // *Astrophys. J. Lett.* — 2017. — Vol. 850. — P. 38—42.
3. *Guzik P., Drahus M., Rusek K. et al.* Interstellar Comet gb00234 // *The Astronomer's Telegram.* — 2019. — № 13100.

**ОБРАБОТКА НАБЛЮДЕНИЙ КОМЕТЫ
21P ДЖАКОБИНИ—ЦИННЕРА, ПОЛУЧЕННЫХ
НА ЗВЕНИГОРОДСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ ИНАСАН**

Е. В. Ефремова

Институт астрономии Российской академии наук

В 2019 г. был проведен анализ изображений кометы 21P/Giacobini-Zinner, полученных в период с 14.08.1985 по 18.10.1985 на Астрографе Цейсс-400/2000 Звенигородской обсерватории ИНАСАН. Архив был получен в течение 26 ночей и включает 41 изображение, пригодное для астрометрии, фотометрии и астрофизических исследований. Отобраны однородные по типу фотоэмульсии и по времени экспозиции негативы, которые ранее были отсканированы и позволяют выполнить стандартную фотометрическую обработку.

**PROCESSING OF THE OBSERVATIONS OF COMET
21P GIAKOBINI—ZINNER OBTAINED
AT THE ZVENIGOROD OBSERVATORY
OF THE INASAN**

E. V. Efremova

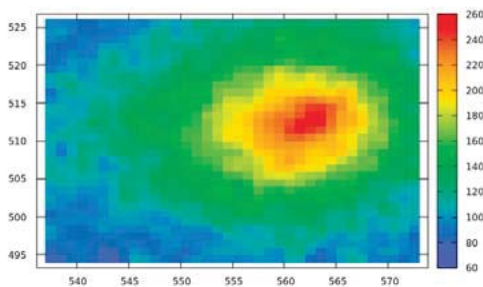
Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences

In 2019, an analysis was carried out of the images of comet 21P / Giacobini-Zinner, obtained from 08/14/1985 to 10/18/1985 on the Zeiss-400/2000 Zvenigorod Astrograph INASAN Observatory. The archive was obtained over 26 nights and includes 41 images suitable for astrometry, photometry and astrophysical research. Negatives that were homogeneous in type of emulsion and exposure time were selected, scanned and now allow to perform a standard photometric processing.

Комета 21P Джакобини—Циннера обнаружена 20 декабря 1900 г. и считается кометой семейства Юпитера. Период ее обращения составляет 6.6 г. При каждом сближении с Солнцем комета теряет от 1 до 3.5 % своей массы. Исследования кометной активности и темпов

потери ее массы актуальны для изучения влияния негравитационных эффектов на движение кометы и ее замедление.

Составлена методика определения отклонения хвоста кометы от направления комета—Солнце. Для фотопластинки номер 1228, полученной 26.08.1985 (см. рисунок), проведен анализ отклонения хвоста кометы. В это время комета проходила достаточно близко к Солнцу, так что кометная активность и появление хвоста стали хорошо заметны на изображении. Для даты 26.08.1985 получено значение тангенса позиционного угла -6.7125 . Это означает, что хвост кометы, видимый на фотопластинках, отклонен на значительное расстояние от прямой комета—Солнце и является пылевым. Планируется провести подобный анализ для других фотопластинок из архива.



Комета Джакобини—Циннера на фотопластинке 1228 (вверху) и профиль ее яркости для фотопластинки 1228 (внизу)

МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНОГО ДИСКА NGC 1566 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГРАФИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОРОВ

Р. В. Золотарев, Б. Б. Жмайлов, В. И. Корчагин

Южный федеральный университет

Рассматривается задача о динамике трехмерного бесстолкновительного диска галактики NGC1566, модель которого построена на основе наблюдательных данных. Динамика исследуется методом прямого интегрирования задачи N тел с использованием графических процессоров и технологии CUDA. Результаты моделирования демонстрируют, что диск с параметрами, соответствующими наблюдаемому, неустойчив по отношению к образованию глобального спирального узора. Оценка угловой скорости спирального узора в модели в пределах ошибок согласуется с наблюдениями.

NUMERICAL SIMULATION OF COLLISIONLESS DISK OF NGC 1566 USING GRAPHICS PROCESSING UNITS

R. V. Zolotarev, B. B. Jmailov, V. I. Korchagin

Southern Federal University

A numerical approach is used to study dynamics of a three-dimensional collisionless disk of NGC 1566 galaxy. An equilibrium model was constructed on the basis of observational data. Dynamics was modeled with direct N-body integration involving graphics processing units and CUDA technology. Simulation shows that the disk is unstable to formation of a two-armed spiral pattern. Estimation of pattern angular speed in the model is consistent with observational data.

Галактика NGC 1566 на протяжении ряда лет является объектом активных исследований. В частности, для нее были измерены кривая вращения [1, 2], дисперсия скоростей в диске [3], профиль поверхностной плотности [1] и угловая скорость спирального узора [2]. Целью данной работы является исследование процесса формирования и эволюции спиральной структуры в галактике NGC 1566.

На основании указанных наблюдательных данных при помощи методики Эриквиста [4] строится равновесная многокомпонентная модель диска с заданными параметрами. Для численного интегрирования задачи N тел применяется метод предиктор-корректор второго порядка («leapfrog») [5]. Вычисления производились при помощи специально разработанного высокопараллельного алгоритма, использующего графические процессоры и технологию CUDA.

Анализ получившегося распределения частиц в модели явно демонстрирует образование глобальной двухрукавной структуры с угловой скоростью 21.6 ± 1 км/с/кпк, согласующейся с наблюдаемой 23 ± 2 км/с/кпк [2]. Формирование структуры слабо возмущает общее усредненное распределение частиц, и в ходе эволюции поверхностная плотность и кривая вращения соответствуют наблюдаемым.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и образования (проект 3.858.2017/4.6).

Библиографические ссылки

1. *Elagali A., Staveley-Smith L., Rhee J. et al.* WALLABY early science - III. An H I study of the spiral galaxy NGC 1566 // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2019. — Vol. 487, № 2. — P. 2797–2817. 1905.09491.
2. *Agüero E. L., Díaz R. J., Bajaia E.* NGC 1566: Spectroscopy of a symmetric system with Seyfert nucleus // *Astron. Astrophys.* — 2004. — Vol. 414. — P. 453–461.
3. *Bottema R.* The stellar velocity dispersion of the spiral galaxies NGC 1566 and NGC 2815. // *Astron. Astrophys.* — 1992. — Vol. 257. — P. 69–84.
4. *Hernquist L.* N-Body Realizations of Compound Galaxies // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* — 1993. — Vol. 86. — P. 389.
5. *Binney J., Tremaine S.* Galactic Dynamics: Second Edition. — 2008.

УБЕГАНИЕ АТМОСФЕР ГОРЯЧИХ НЕПТУНОВ

Е. С. Калиничева, В. И. Шематович, Я. Н. Павлюченков

Институт астрономии РАН

В настоящей работе при помощи одномерной самосогласованной модели [1] был произведен расчет убегания атмосферы для планет класса горячих нептонов. У рассматриваемых объектов обнаружена двухуровневая структура атмосферы.

ATMOSPHERIC ESCAPE OF CLOSE-IN NEPTUNES

E. S. Kalinicheva, V. I. Shematovich, Ya. N. Pavlyuchenkov

Institute of Astronomy RAS

We used the previously developed self-consistent 1D model of hydrogen-helium atmosphere with suprathermal electrons accounted [1] to calculate the rate of close-in Neptune atmospheric loss. The two-scale structure of the close-in (hot) Neptune atmosphere was found.

Экзопланеты со значительными водородно-гелиевыми атмосферами были открыты в большом количестве, многие из них находятся на очень близких к родительской звезде орбитах. Чрезвычайно высокий уровень излучения вызывает у таких планет гидродинамическое убегание атмосферы. Подобное наблюдается посредством транзитной спектроскопии у нескольких близких систем с горячими юпитерами, суперземлями и мини-нептунами. Горячие нептоны — это внесолнечные планеты с массами и радиусами порядка соответствующих параметров планеты Нептун Солнечной системы, но с гораздо более высокими температурами на уровне термосферы, до 10 000 К. Это повышение температуры вызвано поглощением высокоэнергетичного потока от родительской звезды, по отношению к которой планета расположена очень близко.

Несмотря на обнаружение большого числа внесолнечных юпитеров и земель на близких к родительской звезде орбитах, количество горячих нептонов (0.6—18 масс Нептуна, орбитальный период меньше трех дней) оказалось очень маленьким. Соответствующая

область на диаграмме масса—период названа «Пустыней горячих нептонов». Общепринятое объяснение этому явлению состоит в том, что такие планеты не обладают достаточной массой, чтобы удерживать свою газовую оболочку, которая утекает под действием жесткого ультрафиолетового излучения родительской звезды. Чтобы проверить эту гипотезу, мы использовали ранее созданную самосогласованную одномерную аэрономическую модель водородно-гелиевой атмосферы, включающую надтепловые электроны [1]. При проведении расчетов была обнаружена двухуровневая структура атмосферы горячего нептона: нижняя часть атмосферы более массивная, имеет экспоненциальный спад плотности, в то время как плотность верхней части атмосферы, короны, изменяется по степенному закону. Представлены зависимости темпа потери массы от параметров орбиты и возраста родительской звезды. Мы пришли к выводу, что наличие Пустыни горячих нептонов не может объясняться только лишь потерей атмосферы за счет жесткого звездного излучения [2]. В случае относительно маломассивных горячих нептонов оценка верхнего предела оттока массы совпадает с оценками [3] уровня фотоиспарения атмосферы. В случае более массивных горячих нептонов подобный механизм не приводит к потере значительной доли атмосферы.

Работа была выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-12-00447.

Библиографические ссылки

1. *Ionov D. E., Shematovich V. I., Pavlyuchenkov Ya. N.* Influence of Photoelectrons on the Structure and Dynamics of the Upper Atmosphere of a Hot Jupiter // *Astronomy Reports*. — 2017. — Vol. 61, iss. 5. — P. 387–392.
2. *Ionov D. E., Pavlyuchenkov Ya. N., Shematovich V. I.* Survival of a planet in short-period Neptunian desert under effect of photo-evaporation // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2018. — Vol. 476, iss. 4. — P. 5639–5644.
3. *Owen J. E.* Atmospheric Escape and the Evolution of Close-In Exoplanets // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. — 2019. — Vol. 47. — P. 67–90.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ПЕРВИЧНЫХ ПРОТОЗВЕЗДНЫХ ДИСКОВ

**Н. С. Каргальцева^{1,2}, А. Е. Дудоров^{1,2},
С. А. Хайбрахманов^{1,2}**

¹ *Челябинский государственный университет,*

² *Уральский федеральный университет*

С помощью численного магнитогазодинамического (МГД) моделирования исследуется образование первичных дисков в процессе коллапса замагниченных вращающихся ядер молекулярных облаков (протозвездных облаков). На начальных стадиях изотермического коллапса в результате сжатия преимущественно вдоль линий магнитного поля образуется оптически тонкий первичный диск, находящийся в квазимагнитостатическом равновесии. Определяются размеры, массы и угловые моменты первичных дисков. Расчеты показывают, что к моменту образования оптически непрозрачного протозвездного диска размер первичного диска равен 5 000—19 000 а. е., а масса составляет порядка 1 % от начальной массы облака.

NUMERICAL SIMULATION OF PRIMARY PROTOSTELLAR DISK FORMATION

**N. S. Kargaltseva^{1,2}, A. E. Dudorov^{1,2},
S. A. Khaibrakhmanov^{1,2}**

¹ *Chelyabinsk State University,* ² *Ural Federal University*

The formation of primary disks during the collapse of magnetized rotating cores of molecular clouds (protostellar clouds) is investigated using numerical magnetohydrodynamic (MHD) modeling. Primary disks are optically thin and are in state of quasi-magnetostatic equilibrium. They form at the initial stages of isothermal collapse mainly along the magnetic field lines. The sizes, masses and angular momentums of primary disks are determined. Calculations show that, at the time of formation of an optically opaque protostellar disk, the size of the primary disk is 5 000—19 000 AU, and the mass is about 1 % of the initial mass of the cloud.

Исследуется начальная стадия звездообразования, когда протозвездное облако является прозрачным к собственному тепловому излучению. Рассматриваются протозвездные облака с массами от $1M_{\odot}$ до $10M_{\odot}$, температурой 20 К, магнитным полем 1—100 мкГс и с начальной угловой скоростью 10^{-15} — 10^{-14} с $^{-1}$. В качестве начальных безразмерных параметров, определяющих начальные характеристики облака, используются тепловой ε_t , магнитный ε_m , вращательный ε_w параметры. Данные параметры являются отношением тепловой, магнитной, вращательной энергии к модулю гравитационной энергии соответственно. Расчеты осуществляются численно с помощью двумерного МГД-кода EnLiL [1] до момента образования непрозрачного ядра. Определяются размеры, массы и угловые моменты первичных дисков в зависимости от начальных параметров облака: $0.1 \leq \varepsilon_t \leq 0.9$, $0 \leq \varepsilon_m \leq 0.6$, $0 \leq \varepsilon_w \leq 0.04$.

Расчеты показывают, что в процессе изотермического коллапса магнитного вращающегося протозвездного облака формируется иерархическая структура. Оболочка облака принимает сплюснутую форму вдоль силовых линий магнитного поля и вдоль оси вращения с соотношением осей в среднем 1:2. Внутри оболочки формируется оптически и геометрически тонкий первичный диск, находящийся в квазимагнитостатическом равновесии. Размер первичного диска равен 5 000—19 000 а. е., масса составляет порядка 1 % от начальной массы облака. Внутри первичного диска формируется оптически толстый диск, из которого при дальнейшей эволюции формируется протозвезда, окруженная протозвездным диском.

Работа Н. С. Каргальцевой выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 19-72-10012), работа А. Е. Дудорова — при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 18-02-01067), работа С. А. Хайбрахманова — при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 18-52-52006).

Библиографические ссылки

1. Дудоров А. Е., Жилкин А. Г., Кузнецов О. А. Двумерный численный код для осесимметричных самогравитирующих МГД-течений // Матем. моделирование. — 1999. — Т. 109. — С. 127.

ИЗЛУЧЕНИЕ В ЛИНИЯХ МОЛЕКУЛ ВБЛИЗИ ОБЛАСТИ Н II S235

М. С. Кирсанова¹, А. Ф. Пунанова²

¹*Институт астрономии РАН,* ²*Уральский федеральный университет*

В докладе представлены карты распределения малоатомных углеводородов C_2H , $c-C_3H_2$, а также молекул формальдегида и метанола вблизи области Н II S235.

MOLECULAR LINE EMISSION TOWARDS NII REGION S235

M. S. Kirsanova¹, A. F. Punanova²

¹*Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences,*
²*Ural Federal University*

We present the abundance maps of small hydrocarbons C_2H and $c-C_3H_2$ and molecules H_2CO and CH_3OH towards the S235 N II region.

В докладе представлены карты распределения малоатомных углеводородов C_2H , $c-C_3H_2$, а также молекул формальдегида и метанола вблизи области Н II S235. Распределения содержаний молекул получены с помощью карт радиояркости излучения в линиях $C_2H(1-0)$, $c-C_3H_2(2-1)$, $H_2CO(2-1)$ и $CH_3OH(3-2)$ и (5–4). Сама область Н II имеет видимый размер около $5'$ (линейный размер около 2.5 пк), расположена на обращенной к наблюдателю стороне молекулярного облака. Проведен анализ пространственных распределений содержаний молекул. Основное внимание уделяется одной из боковых стенок области Н II — той, где «слоистая» структура перехода от ионизованного к молекулярному газу видна наилучшим образом. Эти слои включают в себя фронт ионизации, область фотодиссоциации (ФДО) и слой молекулярного газа.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-12-00351.

О СТРУКТУРЕ ТЕЧЕНИЯ В МАССИВНОЙ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩЕЙ ДВОЙНОЙ СИСТЕМЕ UU CAS

Д. А. Кононов¹, С. Ю. Горда², С. Ю. Парфенов²

¹*Институт астрономии РАН,*

²*Уральский федеральный университет*

Представлены результаты спектральных наблюдений и доплеровской томографии в линии $H\alpha$ массивной двойной взаимодействующей системы UU Cas. Анализ эмиссионных профилей спектральной линии $H\alpha$ и соответствующей доплеровской томограммы позволил выяснить, что звезда UU Cas представляет собой полуразделенную двойную систему, находящуюся, по-видимому, на поздней стадии первого массобмена. Выявлены основные элементы структуры течения в системе, которыми являются струя из внутренней точки Лагранжа, звездный ветер от компонента, набирающего массу (аккректора), и диффузная, дискообразная газовая оболочка.

ON THE FLOW STRUCTURE IN THE MASSIVE INTERACTING BINARY SYSTEM UU CAS

D. A. Kononov¹, S. Yu. Gorda², S. Yu. Parfenov²

¹*Institute of Astronomy of the RAS,* ²*Ural Federal University*

We present the results of spectroscopic observations and $H\alpha$ Doppler tomography of the massive close binary system UU Cas where a giant star fills its Roche lobe (donor) and transfers material through the vicinity of the L1 point onto a massive but rather compact stellar companion (accretor). By analyzing the obtained spectra and computed Doppler tomogram we suggest that at least three elements of the gas dynamic pattern in the system contribute to the Balmer $H\alpha$ emission line profiles. These elements are: the stream from the L1 point, stellar wind from the accretor, and a diffuse disk, surrounding the accretor.

В работе проведено исследование орбитальной эволюции эмиссионного компонента профилей линии $H\alpha$. Показано, что на орбитальных фазах от $\phi \approx 0$ до $\phi \approx 0.3$ отчетливо выделяется компонент Р

Сугні профиля, который постепенно исчезает на более поздних фазах. По результатам анализа изменений, происходящих с профилем линии $\text{H}\alpha$ с изменением орбитальной фазы, предложена феноменологическая модель структуры течения в системе, включающая такие элементы, как струя из внутренней точки Лагранжа, звездный ветер от компонента, набирающего массу (аккретора), и диффузная, дискообразная газовая оболочка. На ранних орбитальных фазах, где струя направлена от наблюдателя, ее вклад в эмиссионный профиль смещен в сторону положительных лучевых скоростей. А в области отрицательных лучевых скоростей на ранних орбитальных фазах хорошо заметен абсорбционный компонент Р Сугні профиля, который, по всей видимости, формируется в ветре аккретора (массивной, но относительно компактной звезды). На орбитальных фазах $\phi \geq 0.5$ скорости в струе направлены уже в сторону наблюдателя. Из-за этого ее вклад в полный профиль смещается в сторону отрицательных лучевых скоростей и заливает абсорбционный компонент Р Сугні профиля и на фазах $\phi \geq 0.5$ абсорбции в профилях линии $\text{H}\alpha$ не наблюдается.

Для проверки предложенной модели, а также для более детального исследования структуры течения была построена доплеровская томограмма системы. На томограмме отчетливо выделяются такие элементы течения, как струя из внутренней точки Лагранжа, и диффузная, дискообразная газовая оболочка. Причем размер оболочки в скоростных координатах достаточно хорошо согласуется с оценками кеплеровской скорости у поверхности звезды аккретора — $V_K \approx 580$ км/с. Подтвержденное наличие струи из внутренней точки Лагранжа позволяет сделать вывод о том, что UU Cas представляет собой полуразделенную взаимодействующую систему, находящуюся в стадии первого массообмена, который возник из-за заполнения полости Роша изначально более массивным компонентом. Полностью работа опубликована в [1].

Библиографические ссылки

1. *Kononov D. A., Gorda S. Yu., Parfenov S. Yu.* On the Gas Dynamic Features of the Interacting Binary System UU Cas // *Astrophys. J.* — 2019. — Vol. 883, № 2. — P. 186.

ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЕ КАРТИРОВАНИЕ ПРОТОПЛАНЕТНОГО ВЕЩЕСТВА

Н. А. Кругликов^{1,2,3}, В. В. Крушинский¹,
В. И. Гроховский¹, Г. В. Лямова¹, А. А. Попов¹,
С. В. Назаров⁴

¹Уральский федеральный университет, ²Институт физики металлов УрО РАН, ³Уральский государственный экономический университет, ⁴Крымская астрофизическая обсерватория РАН

Представлены результаты лабораторных исследований метеоритного вещества и дистанционных наблюдений Солнца, Луны, ярких звезд при помощи гиперспектральной камеры SPECIM IQ. Кратко описаны методика и результаты.

HYPERSPECTRAL IMAGING OF PROTOPLANETARY MATTER

N. A. Kruglikov^{1,2,3}, V. V. Krushinsky¹, V. I. Grokhovsky¹,
G. V. Lyamova¹, A. A. Popov¹, S. V. Nazarov⁴

¹Ural Federal University, ²Institute of Metal Physics, UB of RAS,
³Ural State University of Economics, ⁴Crimean Astrophysical
Observatory

Results of laboratory meteorites investigations and remote observations of the Sun, the Moon and some navigation stars using Specim IQ hyperspectral camera are presented. Methods and results are described briefly.

Гиперспектральная спектроскопия — новая методика, позволяющая осуществлять дистанционные спектроскопические наблюдения различных объектов или изучать их в лабораторных условиях. Цель работы — изучение спектральных особенностей метеоритов различных типов при помощи гиперспектральной камеры SPECIM IQ [1]. Проведены как дистанционные наблюдения небесных тел (Солнце, Луна, Юпитер, яркие звезды), так и лабораторные исследования метеоритного вещества. Наблюдения звезд и планет проводили с использованием штатива в ночное время, подбирая экспозицию камеры

так, чтобы максимально использовать динамический диапазон сенсора. Для регистрации спектров отражения лунной поверхности дополнительно использован телескоп Мицар с ручным гидированием. Для регистрации спектров излучения Солнца и спектров отражения метеоритов в солнечном излучении использован солнечный телескоп АЦУ-5. Для лабораторных исследований задействованы солнечный свет, лампы накаливания, светодиоды, пламя горения различных видов топлива. Для калибровки камеры применены узкополосные оптические фильтры. Кроме того, был изготовлен специальный затемненный бокс. В качестве объектов исследования использованы метеориты различных типов (хондриты, дифференцированные метеориты).

Спектры снимали с полированной поверхности так, чтобы их регистрация происходила в условиях диффузного рассеяния. Для более точной интерпретации спектры тех же образцов получали при помощи лабораторного спектрометра Lambda 3 Perkins Elmer. Кроме того, был использован спектрометр низкого разрешения оригинальной конструкции. В качестве осветителя использовали галогенную лампу. Для позиционирования пучка на образце применяли лазерный луч. Спектры регистрировали при помощи зеркальной фотокамеры EOS 350D в режиме максимального разрешения и записывали в RAW формате для дальнейшей обработки. Анализ полученных данных позволил исследовать влияние ударного нагружения и отжигов на спектральные характеристики хондритов, сравнить спектры отражения различных фаз метеоритного вещества для метеоритов разных типов и провести сравнение спектров отражения реголита различных областей лунной поверхности. Такой подход позволяет высказывать предположения о составе и форме спектров отражения астероидов различных типов по неполному набору информации и проводить соответствующие наблюдения. Обсуждаются возможности телескопических наблюдений спектров отражения астероидов.

Работа выполнена в рамках бюджетной темы «Давление», №АААА-А18-118020190104-3 при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект 5.4825.2017/6.7.

Библиографические ссылки

1. *Kruglikov N. A., Muftakhetdinova R. F., Grokhovsky V. I.* Hyperspectral imaging of meteorites // *Meteoritics and Planetary Science.* — 2019. — Vol. 54. — P. 6371.

ПОИСК ТРЕТЬЕГО ТЕЛА В СИСТЕМАХ ДВОЙНЫХ ЗВЕЗД МЕТОДОМ ТАЙМИНГА НА ПРИМЕРЕ FL LYR

Е. А. Крюкова¹, С. В. Назаров²

¹*Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнева*

²*Крымская астрофизическая обсерватория*

Работа посвящена написанию и тестированию программного кода на платформе MatLab для поиска третьего тела в системах затменно-переменных звезд и нахождения его периода обращения. Для системы FL Lyr программа позволила получить независимый результат, в точности соответствующий предшествующим определениям.

SEARCH FOR THIRD BODY IN DOUBLE-STAR SYSTEMS TIMING BY THE EXAMPLE FL LYR

E. A. Kryukova¹, S. V. Nazarov²

¹*Reshetnev Siberian State University of Science and Technology,*

²*Crimean Astrophysical Observatory*

The work is devoted to writing and testing program code on the MatLab platform, to search for a third body in eclipsing variable star systems and finding its period of revolution. Our program allowed us to obtain an independent result for the FL Lyr system exactly corresponding to the results obtained earlier.

В современной астрономии открытие и исследование экзопланет — одна из наиболее активно развивающихся областей. Одним из способов поиска является поиск планет в двойных затменных системах. В работе [1] приведен список известных двойных затменно-переменных звезд, вокруг которых с большой вероятностью вращается планета. Исходя из этого списка была проведена работа [2] по поиску третьего тела в системе FL Lyr.

Данная работа посвящена написанию и тестированию программного кода на платформе MatLab для поиска третьего тела в системах затменно-переменных звезд и нахождения его периода обращения. Программа состоит из нескольких частей. Сначала она

идентифицирует «сырые» данные с телескопа Кеплер и преобразует их в более «привычный вид» (юлианская дата, звездная величина). При помощи эфемериды (начальный момент минимума и период обращения затменно-переменной звезды), взятой из каталога ОКПЗ, высчитываются значения фазы и строится фазовая кривая затменно-переменной звезды FL Lyr. Затем необходимо определить моменты главных минимумов двойной системы для вычисления О-С (разница наблюдаемых и теоретических значений главных моментов минимума). Позже при помощи преобразования Фурье мы находим наиболее вероятные периоды обращения третьего тела, анализируем величины О-С, полученные для каждого периода, и вычисляем параметры синусоид, которые лучшим образом аппроксимируют график зависимости моментов минимума от времени. По полученному распределению мы ищем значения периода обращения третьего тела и вероятность достоверности этого периода.

Наша программа позволила получить независимый результат, в точности соответствующий результатам, полученным авторами в статье [2].

Библиографические ссылки

1. *Tutukov A. V., Bogomazov A. I.* The search for planets around eclipsing binary stars // *Astronomy Reports.* — 2012. — Vol. 56, № 10. — P. 775–783.
2. *Kozyreva V. S., Bogomazov A. I., Demkov B. P. et al.* An Exo-Jupiter candidate in the eclipsing binary FL Lyr // *Astronomy Reports.* — 2015. — Vol. 59, № 11–12. — P. 1036–1052. 1510.02111.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЭФФЕКТА ЯРКОВСКОГО НА ДИНАМИКУ АСТЕРОИДОВ С МАЛЫМИ ПЕРИГЕЛИЙНЫМИ РАССТОЯНИЯМИ

О. Н. Летнер, Т. Ю. Галушина

Томский государственный университет

В работе рассмотрено влияние эффекта Ярковского на динамику 40 астероидов с перигелийными расстояниями менее 0.15 а. е. В качестве параметра для учета эффекта используется трансверсальное ускорение A_2 . Путем варьирования A_2 определяется минимальное значение среднеквадратической ошибки представления наблюдений и подбирается оптимальное значение параметра для каждого астероида. Детально исследована динамика астероида 504181 2006 TC на интервале времени $(-5\,000, 4\,000)$ лет и выявлены все особенности его движения.

THE ESTIMATE OF THE YARKOVSKY EFFECT INFLUENCE ON THE DYNAMICS OF THE ASTEROIDS WITH SMALL PERIHELION DISTANCES

O. N. Letner, T. Yu. Galushina

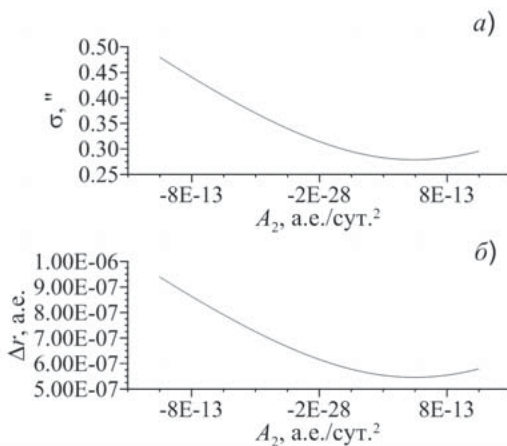
Tomsk State University

We consider the influence of the Yarkovsky effect on the dynamics of 40 asteroids with perihelion distances less than 0.15 AU. The transverse acceleration A_2 is used as a parameter to account for the effect. Varying A_2 we determine the minimum value of the mean-square error of the observation representation and select the optimal value of the parameter for each asteroid. The dynamics of the asteroid 504181 2006 TC in the time interval $(-5\,000, 4\,000)$ years was investigated in detail and all its motion features were revealed.

Эффект Ярковского (ЭЯ) может оказать значительное влияние на движение астероидов с малыми перигелийными расстояниями (менее 0.15 а. е), так как эти объекты регулярно проходят близко

от Солнца. Физические параметры для большинства рассматриваемых астероидов неизвестны, поэтому возникают трудности учета влияния ЭЯ.

В работе получена оценка влияния эффекта для 40 астероидов с малыми перигелийными расстояниями. В качестве параметра для учета ЭЯ использовалось трансверсальное ускорение A_2 , которое определялось из условия минимума среднеквадратической ошибки представления наблюдений σ . Коэффициент A_2 подбирался автоматически для каждого астероида с помощью разработанного авторами программного обеспечения. Показано, что для большинства астероидов учет влияния ЭЯ приводит к уменьшению размера доверительной области. Для более детального исследования выбран астероид 504181 2006 ТС, так как, по предварительной оценке, ЭЯ оказывает на его движение наибольшее влияние. На рисунке представлены графики изменения среднеквадратических ошибок представления наблюдений и МНК-оценок вектора состояния при варьировании параметра A_2 . Выявлены все особенности движения астероида. Стоит отметить, что объект испытывает сближения со всеми планетами земной группы.



Изменение среднеквадратической ошибки представления наблюдений (a) и МНК-оценки вектора состояния (б) в зависимости от параметра A_2 для астероида 504181 2006 ТС

Исследование финансировано грантом Российского научного фонда (проект № 19-72-10022).

**ЭПИЗОДИЧЕСКАЯ АККРЕЦИЯ
В ПРОТОПЛАНЕТНЫХ ДИСКАХ
КАК РЕЗУЛЬТАТ
КОНВЕКТИВНОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ**

Л. А. Максимова, Я. Н. Павлюченков
Институт астрономии Российской академии наук

С помощью модели вязкой эволюции диска и расчета вертикальной структуры исследована эволюция кеплеровского диска. Был выявлен эпизодический характер аккреции и исследовано влияние различных начальных параметров на поведение вспышек в протопланетном диске.

**EPISODIC ACCRETION
IN PROPLANETARY DISCS
AS A RESULT OF CONVECTIVE INSTABILITY**

L. A. Maksimova, Ya. N. Pavlyuchenkov
Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences

Using the model of viscous evolution of the disk and the calculation of the vertical structure, the evolution of the Keplerian disk and its morphology are investigated. The episodic nature of accretion was revealed and the effect of various initial parameters on the behavior of flashes in the protoplanetary disk was investigated.

В представленной работе эволюция кеплеровского диска моделируется с помощью уравнения Прингла [1], описывающего изменение поверхностной плотности со временем под действием вязкости. Одновременно с этим рассчитывается вертикальная структура диска, т. е. распределения плотности и температуры, в рамках модели, представленной в работе [2]. При расчете вертикальной структуры диска учитывается нагрев диска излучением звезды, межзвездным излучением, а также аккреционный нагрев. Диск предполагается гидростатически-равновесным в вертикальном направлении.

В данной работе изучен характер вспышек, выявленных в работе [3], при варьировании набора параметров (температура и область аккреции вещества из оболочки, степенной коэффициент фоновой вязкости, эффективность конвективного переноса). Получены разные режимы аккреции в зависимости от начальных условий.

Библиографические ссылки

1. *Pringle J. E.* Accretion discs in astrophysics // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 1981. — Vol. 19. — P. 137–162.
2. *Vorobyov E. I., Pavlyuchenkov Y. N.* Improving the thin-disk models of circumstellar disk evolution. The 2+1-dimensional model // *Astron. Astrophys.* — 2017. — Vol. 606. — P. A5. 1706.00401.
3. *Pavlyuchenkov Ya. N., Tutukov A. V., Maksimova L. A., Vorobyov E. I.* Evolution of viscous protoplanetary disk with convective regions // *Astron. Rep.* — 2020.

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПЛАНЕТНОЙ СИСТЕМЫ НА КОСМОГОНИЧЕСКИХ ВРЕМЕНАХ

Д. В. Микрюков

Санкт-Петербургский государственный университет

В работе исследуется динамическая эволюция планетных систем HD12661, ν Andromedae, а также некоторых модельных систем на временах порядка 10^5 — 10^7 лет. Осреднение канонических уравнений планетного движения выполняется методом Хори—Депри. Получены и проинтегрированы системы первого и второго приближения по малому параметру.

STUDY OF STABILITY OF A PLANETARY SYSTEM ON A COSMOGONIC TIME SCALE

D. V. Mikryukov

Saint Petersburg State University

The dynamical evolution of planetary systems HD12661, ν Andromedae, and some model systems is investigated on time scale of the order 10^5 — 10^7 years. Averaging the canonical equations of the planetary movement is performed by the Hori—Deprit method. The systems of first and second order approximation with respect to masses have been obtained and numerically integrated.

Каждая аналитическая теория планетного движения сводится к составлению системы дифференциальных уравнений. Разбиение фазовых переменных на группу медленных и группу быстрых переменных обычно достигается за счет использования оскулирующих элементов. Основной интерес представляет эволюция медленных переменных. Для ее изучения применяют, как правило, методы осреднения.

В настоящей работе мы используем метод осреднения Хори—Депри [1] для исследования орбитальной динамики планетных систем HD12661, ν Andromedae, а также некоторых модельных систем. Уравнения движения записываются в астроцентрической системе координат [2, 3]. Метод разложения возмущающей функции использует

коэффициенты Лапласа [4]. За основную систему фазовых переменных приняты канонические комплексные элементы Пуанкаре [4, 5]. Использование последних позволяет в правых частях осредненной системы получить относительно небольшое количество слагаемых.

Осреднение выполнено до первого и второго порядка по малому параметру. Обе системы первого и второго приближения проинтегрированы, на основе чего сделаны выводы об устойчивости рассматриваемых планетных систем на временах порядка 10^5 – 10^7 лет.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19–72–10023.

Библиографические ссылки

1. *Холшевников К. В.* Асимптотические методы небесной механики. — Л. : Изд-во ЛГУ, 1985.
2. *Уинтнер А.* Аналитические основы небесной механики. — М. : Наука, 1967.
3. *Микрюков Д. В.* Разложение гамильтониана планетной задачи в ряд Пуассона в гелиоцентрической системе отсчета // Письма в Астрон. журн. — 2016. — Т. 42. — С. 611–622.
4. *Laskar J., Robutel P.* Stability of the planetary three-body problem. I. Expansion of the planetary Hamiltonian // *Celest. Mech. Dyn. Astr.* — 1995. — Vol. 62. — P. 193–217.
5. *Микрюков Д. В., Холшевников К. В.* Разложение основных функций кеплеровского движения с использованием комплексных переменных // Письма в Астрон. журн. — 2016. — Т. 42. — С. 302–310.

СООТНОШЕНИЕ С/О В ГАЗОВОЙ И ЛЕДЯНОЙ ФАЗЕ В ПРОТОПЛАНЕТНЫХ ДИСКАХ

Т. С. Молярова¹, В. В. Акимкин¹, Д. З. Вибе¹,
Д. А. Семенов²

¹*Институт астрономии РАН,*

²*Институт астрономии Общества Макса Планка*

Соотношение содержаний углерода и кислорода является важным параметром, определяющим химический состав околозвездного протопланетного диска. В данной работе проводится астрохимическое моделирование ансамбля протопланетных дисков. Определяется распределение по диску соотношения С/О в газовой и ледяной фазе в зависимости от физических параметров диска. Показано, что резкое изменение С/О происходит в окрестности линий льдов основных летучих соединений.

C/O RATIO IN GAS AND ICE COMPONENTS OF PROTOPLANETARY DISKS

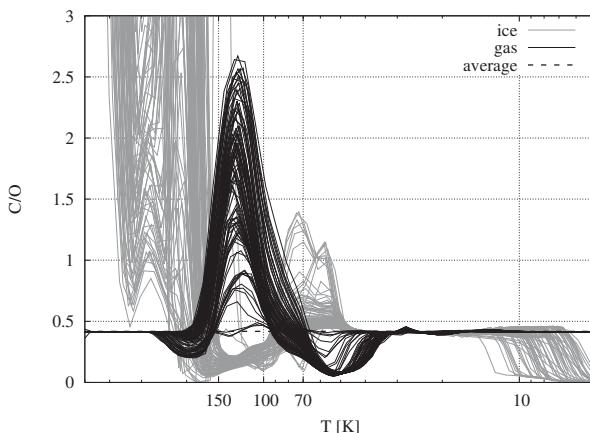
T. S. Molyarova¹, V. V. Akimkin¹, D. S. Wiebe¹,
D. A. Semenov²

¹*Institute of Astronomy, RAS,*

²*Max Planck Institute for Astronomy*

Carbon-to-oxygen ratio is an important parameter determining the chemical layout of protoplanetary disks. In this work, we model chemical structure of a number of protoplanetary disks. We calculate the distribution over the disk of C/O ratio in gas and ice phases for different disk parameters. We show that C/O ratio experiences significant changes in the vicinity of snow lines of major disk volatiles.

Соотношение общего количества атомов углерода к атомам кислорода, входящим в химические соединения, может отличаться для газообразной и твердой составляющих благодаря вымерзанию летучих соединений на поверхность пылинок. Наблюдаемое в атмосферах экзопланет соотношение С/О может наложить ограничения на область протопланетного диска, в которой эта планета формировалась, а также на механизм ее формирования [1].



Распределение усредненного по вертикали распределения C/O в газовой и ледяной фазе в зависимости от температуры в срединной плоскости протопланетного диска для 100 моделей

С помощью астрохимического кода ANDES [2] проведены вычисления химической структуры для ансамбля протопланетных дисков с различными характеристическими радиусами (20–100 а. е.), массами (0.1–10 % M_*), вращающихся вокруг звезд различных масс (0.1–2.5 M_\odot). На рисунке показано распределение соотношения C/O для данного набора моделей при общем C/O = 0.4. Как видно, C/O испытывает резкие изменения вблизи определенных значений температуры, соответствующих температурам сублимации воды (150 K) и CO₂ (70 K).

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 17–12–01441.

Библиографические ссылки

1. Öberg K. I., Murray-Clay R., Bergin E. A. The Effects of Snowlines on C/O in Planetary Atmospheres // *Astrophys. J. Lett.* — 2011. — Vol. 743. — P. L16. 1110.5567.
2. Akimkin V., Zhukovska S., Wiebe D. et al. Protoplanetary Disk Structure with Grain Evolution: The ANDES Model // *Astrophys. J.* — 2013. — Vol. 766. — P. 8. 1302.1403.

ПРОЕКТ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТЕЛЕСКОПА «СИНТЕЗ» (АСТ-1200) В КРАО

С. В. Назаров¹, А. Харченко²

¹*Крымская астрофизическая обсерватория*, ²*АО ЦНТЭЭ*

В 1978 г. в Крымской астрофизической обсерватории был введен в строй передовой по тем временам телескоп «Синтез». Целью создания экспериментального телескопа была отработка технологий создания сегментированной оптики, а также системы контроля пространственного положения зеркал, в том числе и с возможностью компенсации турбулентности в земной атмосфере благодаря быстрым подвижкам каждого зеркала по двум осям. В начале 2018 г. было принято решение о его восстановлении с созданием новой оптики и системы управления. В этой работе мы представляем подробное описание проекта восстановления телескопа и первые результаты.

THE PROJECT FOR THE RESTORATION OF THE SYNTHESIS TELESCOPE (AST-1200) IN CrAO

S. V. Nazarov¹, A. Khartchenko²,

¹*Crimean Astrophysical Observatory*, ²*CNTEE*

In 1978, at the Crimean Astrophysical Observatory, the “Sintez” telescope, was put into operation. The goal of creating of this experimental telescope was to develop technologies for creating segmented optics, as well as a system for controlling the spatial position of mirrors, including the ability to compensate for turbulence in the Earth’s atmosphere thanks to the fast movements of each mirror along two axes. At the beginning of 2018, a decision was made to restore it with the creation of a new optics and control system. In this work, we present a detailed description of the telescope restoration project and the first results.

В 1978 г. в Крымской астрофизической обсерватории был введен в строй передовой по тем временам телескоп «Синтез» (он же «АСТ-1200») [1, 2]. Установлен он в павильоне с откатной крышей,

на экваториальной монтировке вилочного типа. Оптика выполнена по кассегреновской схеме с тонким ситалловым сегментированным главным зеркалом. Оно состоит из шести одинаковых подвижных шестиугольных сегментов и одного центрального неподвижного диаметрами по 40 см [3]. Эксперимент ставился, чтобы выяснить принципиальную возможность создания более крупных зеркал, чем зеркало крупнейшего в мире (на момент начала разработки «Синтеза») телескопа БТА в САО. Целью была отработка технологий создания сегментированной оптики, а также системы контроля пространственного положения зеркал, в том числе и с возможностью компенсации турбулентности в земной атмосфере благодаря быстрым подвижкам каждого зеркала по двум осям. С середины 1980-х до 2018-го телескоп находился на консервации. В начале 2018 г. было принято решение о его восстановлении с созданием новой оптики и системы управления [4].

Библиографические ссылки

1. *Basov N. G.* New astronomical telescope AST-1200 with a segmented, actively controlled segmented primary mirror // SAOSR. — 1979.
2. *Basov N. G. et al.* The MMT and future of ground // Based Astronomy. — 1980. — Vol. 385. — P. 185.
3. *Устинов Н. Д. и др.* Астрономический телескоп АСТ 1200 с составным главным зеркалом // ОМП. — 1985. — Vol. 11.
4. *Сычев В. В.* Технологические аспекты создания крупногабаритных оптических телескопов // Наука и образование. — 2015. — Vol. 2. — P. 269–285.

РЕЗОНАНСНАЯ ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ДВИЖЕНИЯ ПЛАНЕТ-ГИГАНТОВ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

А. С. Перминов, Э. Д. Кузнецов

Уральский федеральный университет

Построена резонансная численно-аналитическая теория движения для планет-гигантов Солнечной системы. В гамильтониан введены две резонансные переменные — критические аргументы резонансов средних движений Юпитер—Сатурн 2:5 и Уран—Нептун 1:2. Разложение резонансного гамильтониана четырехпланетной задачи получено в координатах Якоби по элементам второй системы Пуанкаре. Осреднение гамильтониана проводится методом Хори—Депри до второго порядка по малому параметру. Уравнения движения интегрируются на интервале времени 10 млрд лет.

THE RESONANT SEMI-ANALYTICAL MOTION THEORY FOR GIANT PLANETS OF THE SOLAR SYSTEM

A. S. Perminov, E. D. Kuznetsov

Ural Federal University

The resonant semi-analytical motion theory of Solar system's giant planets is constructed in this work. It is introduced two resonant variables, which are critical arguments of mean motion resonances of Jupiter—Saturn 2:5 and Uranus—Neptune 1:2. The expansion of resonant Hamiltonian of four-planetary problem is constructed in elements of the second system of Poincare by using Jacobi coordinates. The averaged Hamiltonian is constructed by Hori—Deprit method up to the second order of the small parameter. The equations of motion are integrated over time interval 10 Gyr.

Исследование динамической эволюции планетных систем на космогонических интервалах времени требует использования методов

осреднения, суть которых заключается в исключении из гамильтониана задачи всех слагаемых, соответствующих короткопериодическим возмущениям в движении планет. Это позволяет существенно увеличить шаг интегрирования.

После осреднения в слагаемых второго порядка по массам планет и выше возникают знаменатели, представляющие собой линейные комбинации средних движений планет. Если планетная система близка к резонансу средних движений, некоторые знаменатели могут стать малыми величинами, приводящими к экстремальному росту соответствующих слагаемых. Таким образом, классические методы осреднения могут стать неприменимыми. В этом случае необходимо ввести новую резонансную переменную, медленно меняющуюся в окрестности резонанса. Обычно это линейная комбинация средних долгот, соответствующая данному резонансу.

Резонансная численно-аналитическая теория движения построена до второго порядка по массам планет. Гамильтониан четырехпланетной задачи в системе координат Якоби записывается в виде ряда Пуассона по малому параметру и по элементам второй системы Пуанкаре. Отношение суммы масс планет к массе звезды играет роль малого параметра. На примере резонансов средних движений Юпитер—Сатурн $2:5$ и Уран—Нептун $1:2$ показан способ введения двух дополнительных резонансных переменных и их канонически сопряженных. Осреднение гамильтониана и построение уравнений движения в средних элементах проводится методом Хори—Депри [1] с точностью до второй степени по малому параметру.

Все аналитические преобразования с рядами проводятся с помощью системы компьютерной алгебры Piranha [2], являющейся эшелонированным пуассоновским процессором. Построенные уравнения движения интегрируются на интервале времени 10 млрд лет.

Возможно применение реализованных алгоритмов для построения теории движения резонансных внесолнечных планетных систем.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-32-00283 мол_а.

Библиографические ссылки

1. Холшевников К. В. Асимптотические методы небесной механики. — Л. : Изд-во Ленингр. гос. ун-та, 1985.
2. Biscani F. The Piranha computer algebra system. — URL: <https://github.com/bluescarni/piranha>, 2019.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАССЕЯННЫХ ЗВЕЗДНЫХ СКОПЛЕНИЙ ALESSI 98 И RYU 762

Е. С. Постникова

Институт астрономии Российской академии наук

По данным современного высокоточного каталога Gaia DR2 впервые были подробно изучены скопления Alessi 98 и Ryu 762, а также исследованы их окрестности. Произведена оценка расстояния до этих скоплений, получены оценки их собственных движений. С помощью кинематических и пространственных критериев были отобраны наиболее вероятные члены скопления.

INVESTIGATION OF OPEN STAR CLUSTERS ALESSI 98 AND RYU 762

E. S. Postnikova

Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences

According to the modern high-accuracy astrometric catalog Gaia DR2, the Alessi 98 and Ryu 762 clusters were studied in detail as well as their surroundings for the first time. The distance to these clusters was estimated, and estimates of their proper motions were obtained. Using kinematic and spatial criteria, the most likely cluster members were selected.

Рассеянные звездные скопления играют значительную роль в понимании формирования и эволюции Галактики: они в своем многообразии имеют большой разброс по возрасту, расстоянию и другим свойствам. На данный момент считается, что значительная часть звезд рождается в скоплениях, поэтому всестороннее изучение свойств этих объектов является важным. С появлением новых обзоров неба также были открыты новые скопления, что говорит о том, что исследования в этой области не стоят на месте. Также благодаря высокоточным астрометрическим каталогам появилась возможность по-новому рассмотреть данные о ранее известных скоплениях.

В данном исследовании представлен анализ ранее малоизученных рассеянных звездных скоплений Alessi 98 и Ryu 762. Скопление

Alessi 98 упоминается в каталоге [1] как астеризм, однако, по данным каталога Gaia DR2, в данной области четко видно сгущение звезд, которое также проявляет характерную для скопления общность движения на диаграмме собственных движений. Скопление Ryu 762 ранее было обнаружено как сгущение звезд по данным глубоких инфракрасных обзоров [2], однако теперь этот объект виден и в оптическом диапазоне, что позволило более глубоко изучить его свойства. Астрометрический отбор членов скопления производился способом максимального правдоподобия. По данным наиболее надежных членов скопления (звезды, с вероятностью $P > 60\%$) были определены кинематические параметры скоплений и расстояния до них. Мы оценили собственные движения по μ_α и μ_δ для Alessi 98 как 7.9 и 0.6 мсд/год, для Ryu 762 как 0.9 и -7.7 мсд/год соответственно. Оценка расстояния до скопления Alessi 98 составляет 588 пк, для Ryu 762—680 пк.

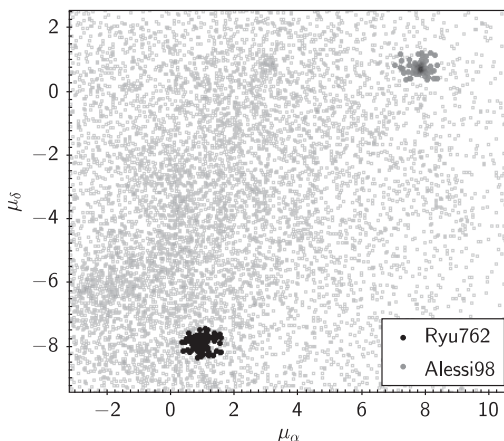


Диаграмма собственных движений рассеянных звездных скоплений Alessi 98 и Ryu 762

Библиографические ссылки

1. Bica E., Pavani D. B., J. Bonatto C., F. Lima E. A Multi-band Catalog of 10978 Star Clusters, Associations, and Candidates in the Milky Way // Astron. J. — 2019. — Vol. 157. — P. 12.
2. Ryu J., Lee M. G. A WISE Survey of New Star Clusters in the Central Plane Region of the Milky Way // Astrophys. J. — 2018. — Vol. 856. — P. 17.

МОДЕЛЬ ИДЕАЛЬНОЙ ЖИДКОСТИ В ПРИМЕНЕНИИ К ОПИСАНИЮ НЕКОТОРЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЕМНОЙ МАТЕРИИ

А. А. Потапов, Г. Р. Нигматуллина

*Стерлитамакский филиал Башкирского государственного
университета*

В статье приведено описание темной материи с помощью модели идеальной жидкости.

THE MODEL OF PERFECT LIQUID AS APPLIED TO THE DESCRIPTION OF SOME PARAMETERS OF DARK MATTER

A. A. Potapov, G. R. Nigmatullina

Sterlitamak branch of Bashkir State University

The article describes the dark matter using the ideal fluid model.

Темную материю можно математически описать с помощью модели идеальной жидкости. Далее предполагается, что единственным источником гравитации является сферически распределенная темная материя.

В общем случае статическое сферически-симметричное пространство-время описывается метрикой вида

$$ds^2 = -\exp^{v(r)} dt^2 + \exp^{\lambda(r)} dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2), \quad (1)$$

где $v(r)$ и $\lambda(r)$ — метрические потенциалы. Для идеальной жидкости тензор энергии-импульса T_{β}^{α} задается как $T_t^t = \rho(r)$, $T_r^r = T_{\theta}^{\theta} = T_{\varphi}^{\varphi} = p(r)$, где $\rho(r)$ есть плотность энергии, а $p(r)$ — изотропное давление. Точное решение полевых уравнений с учетом данных кривых вращения имеет вид

$$\exp^{v(r)} = B_0 r^l, \exp^{-\lambda(r)} = \frac{c}{a} + \frac{D}{r^a}, a = -\frac{4(1+l)-l^2}{2+l},$$

$$c = -\frac{4}{2+l}, l = -\frac{2v_c^2}{c_0^2}, \quad (2)$$

где $B_0 > 0$, D есть постоянные интегрирования, а v_c — круговая скорость пробных частиц, в качестве которых рассматриваются атомы нейтрального водорода, вращающиеся по круговым орбитам. Точные значения плотности энергии и давления определяются из уравнений

$$\rho(r) = \frac{1}{8\pi} \left[\frac{l(4-l)}{4+4l-l^2} r^{-2} - \frac{D(6-l)(1+l)}{2+l} r^{\frac{l(2-l)}{2+l}} \right], \quad (3)$$

$$p(r) = \frac{1}{8\pi} \left[\frac{l^2}{4+4l-l^2} r^{-2} + D(1+l) r^{\frac{l(2-l)}{2+l}} \right]. \quad (4)$$

Свободно подбираемый параметр D имеет размерность длины в степени минус два и является довольно чувствительным. Так как вещество в гало не является экзотическим и обуславливает притяжение, а значит, параметр $\omega(r) = \frac{p(r)}{\rho(r)} \geq 0$ во всей области гало.

Нетрудно заметить, что интегрируемая величина, получаемая из (3) (введем для нее обозначение $M_0 = 4\pi \int_0^r \rho(r) r^2 dr$), идентична ньютоновской массе M_N . В определенном смысле можно считать M_N постньютоновской репликой M_0 , так как $\rho(r)$ выражается в производных постньютоновской массы. Возникает вопрос: какая величина, полученная из точного решения, явным образом отличается от своей постньютоновской реплики? Одной из таких величин является полная масса, заключенная внутри радиуса r , определяемая из (3) и (4):

$$M_{total}(r) = 4\pi \int_0^r (\rho + 3p) r^2 dr = \frac{l(2+l)r}{4+4l-l^2} + \frac{2D}{l-6} r^{\frac{4+4l-l^2}{2+l}} = \quad (5)$$

$$= \frac{lr}{2} + \frac{Dlr^3}{3} - \frac{l^2r}{4} + O(l^2). \quad (6)$$

Теоретически предсказанные и практически наблюдаемые массы в принципе могут быть различны в зависимости от произвольного значения D , даже если оно нулевое. Таким образом, мы приходим к необходимости дополнительного определения некоторых постньютоновских параметров. Эта задача может быть решена при помощи формализма Фабера—Виссера.

ДИНАМИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ПАР АСТЕРОИДОВ НА БЛИЗКИХ ОРБИТАХ В ОКРЕСТНОСТИ РЕЗОНАНСОВ

А. Э. Потоскуев, Э. Д. Кузнецов

Уральский федеральный университет

Рассмотрена динамическая эволюция пар астероидов на близких орбитах в окрестности резонансов средних движений с Юпитером (3:1, 4:1, 5:2, 7:3). Проанализированы сценарии динамической эволюции пар, полученные интегрированием уравнений движения в прошлое и будущее. Показано, что возможность тесного сближения пары, как и ее рассеяния при прохождении резонанса, зависит от величины и знака дрейфа большой полуоси астероидов, обусловленного влиянием эффекта Яковского.

DYNAMICAL EVOLUTION OF ASTEROID PAIRS IN CLOSE ORBITS NEAR RESONANCES

A. E. Potoskuev, E. D. Kuznetsov

Ural Federal University

Dynamical evolution of asteroid pairs in close orbits near Jovian mean motion resonances (3:1, 4:1, 5:2, 7:3) has been researched. We analyzed scenarios of pair's dynamical evolution by integrating the equations of motion in the future and past. It's shown, that the opportunity of close encountering, as well as the possibility of scattering under passing through the resonances, is dependent on the asteroids' semimajor axis drifts values and signs due to the Yarkovsky effect.

Пары астероидов, движущихся на близких орбитах, могут иметь общее происхождение [1]. Они могут образовываться в результате разрушения крупных астероидов при столкновениях с другими малыми телами, процесса дробления астероида под действием YORP-эффекта или распада двойных (кратных) систем астероидов, например, вследствие BYORP-эффекта. В окрестности резонансов наблюдаются тесные пары, но среди известных астероидов, сближающихся

с Землей, тесных пар не наблюдается. Прохождение через резонансы могут перевести пары астероидов на орбиты, лежащие в области планет земной группы, что может привести к гравитационному рассеянию близких орбит по причине сближений с массивными телами.

Численным методом исследовалась динамическая эволюция пар вблизи резонансов на интервалах 1 млн лет в прошлое и будущее посредством программы Orbit9 комплекса OrbFit [2]. При моделировании учитывались возмущения от больших планет, сжатие Солнца, релятивистские эффекты и дрейф большой полуоси орбиты вследствие эффекта Ярковского. Для оценки максимального значения модуля дрейфа большой полуоси использовалось соотношение, связывающее дрейф большой полуоси и физические параметры астероида (101955) Бенну с параметрами исследуемых астероидов [3]. Исследовались сценарии орбитальной эволюции пар при различных значениях скорости и знаках дрейфа большой полуоси.

Всего было рассмотрено 24 пары астероидов в окрестности резонансов средних движений с Юпитером 3:1, 4:1, 5:2, 7:3 [4]. Динамическая эволюция орбит объектов, как в случае взаимных сближений в прошлом, так и при прохождении через резонансы, существенно зависит от значения скорости и знака дрейфа большой полуоси. Эволюция элементов орбит астероидов зависит от близости пары к резонансу. В некоторых сценариях орбиты объектов не испытывают существенных возмущений на рассмотренном интервале времени. Метрики Холшевникова, вычисленные для орбит пар астероидов, в большинстве случаев увеличиваются при интегрировании в будущее и в ряде сценариев при моделировании эволюции в прошлое.

Библиографические ссылки

1. *Vokrouhlický D., Nesvorný D.* Pairs of Asteroids Probably of a Common Origin // *Astron. J.* — 2008. — Vol. 136. — P. 280—290.
2. *Orbfit Consortium.* OrbFit: Software to Determine Orbits of Asteroids. — *Astrophysics Source Code Library.* — 2011.
3. *Spoto F., Milani A., Knežević Z.* Asteroid family ages // *Icarus.* — 2015. — Vol. 257. — P. 275—289.
4. *Kuznetsov E. D., Potoskuev A. E., Safronova V. S., Ustinov D. S.* Dynamical evolution of asteroid pairs with close orbits // *AIP Conference Proceedings.* — 2019. — Vol. 2103, № 1. — P. 020008.

ЦЕПОЧКА ОБРАЗОВАНИЯ МЕТАНОЛА В ХОЛОДНЫХ ЯДРАХ И ВИДИМОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ СВЕТА: ПРОВЕРКА ХИМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

А. Ф. Пунанова, А. И. Васюнин

Уральский федеральный университет

В этой работе мы представляем карты переходов (2–1) и (3–2) метанола в направлении семи дозвездных ядер в области звездообразования L1495 в Тельце и ищем корреляции между содержанием метанола и видимым поглощением, измеренным по наблюдениям излучения пыли на *Herschel*/SPIRE. Для одного из объектов также представлены карты промежуточных продуктов образования метанола — HCO и H₂CO. В направлении четырех из семи дозвездных ядер в линиях метанола видны кольцевые структуры, тогда как в направлении трех ядер максимум излучения метанола примерно совпадает с пиком излучения пыли. Вероятно, последние ядра моложе остальных, в них еще не успела сформироваться зона вымерзания CO.

COLD METHANOL FORMATION LADDER AND VISUAL EXTINCTION: TEST THE CHEMICAL MODEL

A. F. Punanova, A. I. Vasyunin

Ural Federal University

In this work, we present the maps of the (2–1) and (3–2) methanol transitions towards seven dense cores in the L1495 star-forming region in Taurus. We search for correlation between methanol abundance and visual extinction measured using the *Herschel*/SPIRE dust continuum observations. For one of the cores, we also present the maps of the methanol precursors, HCO and H₂CO. Towards four dense cores, methanol forms ring-like structures while towards three cores methanol emission peak coincides with dust emission peak. These three cores are probably young, they have not formed their CO freeze-out zones yet.

Метанол (CH₃OH) — ключевой прекурсор многих органических и пребиотических молекул, обнаруженных в областях звездо- и планетонеобразования, и поэтому является важным звеном в процессе

усложнения молекулярной структуры в межзвездной среде. Метанол был найден в направлении холодных плотных ядер, где он формирует кольцевые структуры. В условиях холодного ядра метанол должен образовываться на поверхности ледяных мантий межзвездных пылинок путем последовательного присоединения атома водорода к СО: $\text{CO} \rightarrow \text{HCO} \rightarrow \text{H}_2\text{CO} \rightarrow \text{CH}_3\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{OH}$. Химические модели предсказывают, что максимальное содержание CH_3OH в газе должно быть на границе зоны вымерзания СО, где темп вымерзания CH_3OH не превосходит темп его образования. Характерное время вымерзания СО обратно пропорционально плотности газа и поэтому должно коррелировать с поглощением видимого света.

Тогда как CH_3OH в холодных ядрах образуется только на пыли, промежуточные продукты цепочки холодного образования CH_3OH , а именно HCO , H_2CO и CH_3O , могут образовываться не только на пыли, но и в газе. Пути их формирования заданы в теоретических работах и воспроизведены химическими моделями, однако до сих пор не было комплексных наблюдательных исследований, демонстрирующих факт их образования и в газе, и на пыли как промежуточных продуктов цепочки образования метанола. Корреляция же содержания CH_3OH и межзвездного поглощения света была проверена только для отдельных «прототипических» дозвездных ядер в разных областях звездообразования.

В этой работе мы проводим систематическое исследование семи плотных ядер в волокне L1495, маломассивной области звездообразования в молекулярном облаке в Тельце. Мы представляем карты переходов (2–1) и (3–2) метанола и ищем корреляции между содержанием метанола и видимым поглощением, измеренным по наблюдениям излучения пыли на *Herschel*/SPIRE. В направлении четырех из семи дозвездных ядер в линиях метанола видны кольцевые структуры, тогда как в направлении трех ядер максимум излучения метанола примерно совпадает с пиком излучения пыли. Вероятно, последние ядра моложе остальных, в них еще не успела сформироваться зона вымерзания СО. Для одного из объектов также представлены карты промежуточных продуктов образования метанола, HCO и H_2CO . Их излучение присутствует и в «метанольном кольце», но максимум интенсивности приходится на пик излучения пыли, что подтверждает факт их образования и на пыли, и в газе. Для CH_3O даны оценки верхнего предела интенсивности линий.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-12-00351.

СПЕКТРОСКОПИЯ VS ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ: СРАВНЕНИЕ РАДИУСОВ СР-ЗВЕЗД

А. М. Романовская

Институт астрономии Российской академии наук

Определены фундаментальные параметры атмосфер для пяти магнитных химически-пекулярных звезд: HD 111133, HD 188041, HD 118022, HD 110066 и HD 204411 по спектроскопии. Сравнение радиусов, полученных по спектральным наблюдениям с прямыми измерениями радиусов методами интерферометрии для звезд исследования показало, что радиусы согласуются в пределах ошибок измерений. Этот факт позволяет использовать спектроскопические наблюдения для получения точных величин фундаментальных параметров не только для ярких СР-звезд, но и для более слабых СР-звезд, где интерферометрические наблюдения пока невозможны.

SPECTROSCOPY VS INTERFEROMETRY: COMPARISON OF THE CP-STARS RADII

А. М. Romanovskaya

Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences

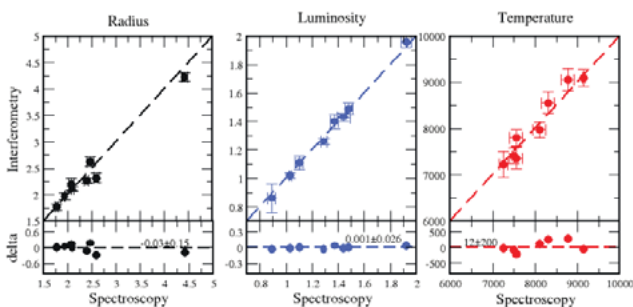
The fundamental parameters of atmospheres were determined for 5 magnetic chemically peculiar stars: HD 111133, HD 188041, HD 118022, HD 110066 and HD 204411 by spectroscopy. The comparison of radii obtained by spectral observations with direct measurements of radii by interferometry methods for study stars showed that the radii are consistent within the measurement errors. This fact makes it possible to use spectroscopic observations to obtain exact values of the fundamental parameters not only for bright CP-stars, but also for weaker CP-stars, where interferometric observations are not yet possible.

Определение фундаментальных параметров звезд (T_{eff} , $\lg g$, R/R_{\odot} и $\log(L/L_{\odot})$) является одной из основных задач астрофизики. Для магнитных Ap-звезд эта задача усложняется аномальным

химическим составом их атмосфер, требующим специальных методов анализа наблюдаемых спектров. Аномальное содержание Ар-звезд заключается в основном в значительном обилии редкоземельных элементов по сравнению с содержанием на Солнце. Механизм, объясняющий подобное создание аномалий химического состава, — диффузия атомов и ионов химического элемента [1].

Цель работы — не только надежно определить фундаментальные параметры Ар-звезд по спектроскопии, но и провести оценку точности. Для этого были собраны параметры звезд, полученных через спектроскопию из предыдущих исследований и интерферометрию.

Сравнение параметров, полученных по спектроскопии и интерферометрии, показало хорошее согласие значений параметров для всех звезд: спектроскопические радиусы в среднем больше интерферометрических на 7 % (см. рисунок). Еще лучше согласуются светимости. Результаты сравнения параметров показывают, что спектроскопические методы позволяют получить значения в пределах ошибок определения этих фундаментальных параметров для более слабых Ар-звезд, где интерферометрические наблюдения пока невозможны.



Сравнение R/R_{\odot} , $\log(L/L_{\odot})$ и T_{eff} звезд, полученных по спектроскопии и по интерферометрии и средние отклонения «delta» соответствующих параметров от спектроскопических

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №19-31-27001.

Библиографические ссылки

1. Michaud G. Diffusion Processes in Peculiar a Stars // Astrophys. J. — 1970. — Vol. 160. — P. 641.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛОКНООБРАЗНОГО ТЕМНОГО ОБЛАКА В ОБЛАСТИ S242

О. Л. Рябухина^{1,2}, Л. Е. Пирогов²

¹*Институт астрономии РАН,*

²*Институт прикладной физики РАН*

Исследована область массивного звездообразования S242 (Sh 2-242), которая находится на расстоянии 2.1 кпк [1] и связана с протяженным пылевым волокном по данным телескопа Гершель [2]. Для получения данных о кинематике области нами в 2018 г. на 20-м телескопе обсерватории Онсала (Швеция) были проведены наблюдения в линиях $^{13}\text{CO}(1-0)$, $\text{C}^{18}\text{O}(1-0)$ и $\text{CS}(2-1)$. По этим данным определена масса газа, изучена кинематика волокна. Существует градиент скорости в направлении юг—север вдоль нити. Ширины линий оптически тонких линий $\text{C}^{18}\text{O}(1-0)$ намного выше, чем тепловые. Линейные массы (масса на единицу длины), рассчитанные по данным $\text{C}^{18}\text{O}(1-0)$, выше критических значений для регионов вблизи краев нити, что подразумевает гравитационную неустойчивость.

STUDY OF THE FILAMENTARY DARK CLOUD IN THE S242 REGION

O. L. Ryabukhina^{1,2}, L. E. Pirogov²

¹*Institute of Astronomy RAS,* ²*Institute of Applied Physics RAS*

An elongated gas-dust filament is associated with the massive star-forming region S242. According to our $^{13}\text{CO}(1-0)$ observations, the length of the filament is more than 30 pc. There is a velocity gradient in the south-north direction along the filament. The line widths of the optically thin $\text{C}^{18}\text{O}(1-0)$ lines are much higher than the thermal ones. Linear masses calculated from the $\text{C}^{18}\text{O}(1-0)$ data are higher than critical values for subregions near the edges of the filament.

Данные, полученные телескопом Гершель, показали, что газопылевые комплексы состоят из волокон различных масштабов, которые содержат в себе сгустки и звездообразующие ядра [3]. Роль волокон

в формировании ядер и в процессе звездообразования в настоящее время активно исследуется как с помощью наблюдений, так и теоретически [4].

Исследуемая волокнообразная область S242 вытянута более чем на 30 пк. Вблизи краев волокна обнаружены скопления внутренних молодых звездных объектов, указывающие на активный процесс звездообразования [2].

Температуры пыли, рассчитанные по данным телескопа Гершель, лежат в диапазоне 12—20 К (наиболее теплая пыль находится вблизи зоны НII), кинетические температуры газа, вероятно, близки к ним (пиковые температуры линий $^{13}\text{CO}(1-0)$ не превышают 25 К). Ширины оптически тонких линий $\text{C}^{18}\text{O}(1-0)$ (≥ 1 км/с) много больше тепловых (≤ 0.2 км/с), что указывает на существенную роль турбулентных движений в волокне.

Используя интегральные интенсивности линий C^{18}O , мы рассчитали лучевые концентрации молекулярного водорода, оценили общую массу волокна $9600 M_{\odot}$. Значения линейной массы (масса на единицу длины) составляет 210—280 M_{\odot} /пк. Для областей на краях волокна эти значения превышают критические, рассчитанные с учетом дисперсии нетепловых движений по данным $\text{C}^{18}\text{O}(1-0)$ (~ 140 —250 M_{\odot} /пк), что указывает на вероятную гравитационную неустойчивость. Также на краях волокна были выделены сгустки повышенной концентрации газа в линиях трассера плотного газа CS.

Наблюдения выполнены при поддержке РФФИ (17-52-45020, 18-02-00660). Анализ данных выполнен при поддержке РНФ (17-12-01256).

Библиографические ссылки

1. Blitz L., Fich M., Stark A. A. Catalog of CO radial velocities toward galactic H II regions // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* — 1982. — Vol. 49. — P. 183–206.
2. Dewangan L. K., Baug T., Ojha D. K. et al. The Molecular Cloud S242: Physical Environment and Star-formation Activities // *Astrophys. J.* — 2017. — Vol. 845. — P. 34. 1707.00395.
3. André P., Men'shchikov A., Bontemps S. et al. From filamentary clouds to prestellar cores to the stellar IMF: Initial highlights from the Herschel Gould Belt Survey // *Astron. Astrophys.* — 2010. — Vol. 518. — P. L102. 1005.2618.
4. Clarke S. D., Whitworth A. P. Investigating the global collapse of filaments using smoothed particle hydrodynamics // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2015. — Vol. 449. — P. 1819–1825. 1502.07552.

ТЕМПЕРАТУРА ГАЗА В МОЛЕКУЛЯРНОМ ВОЛОКНЕ WB 673

О. Л. Рябухина^{1,2}, М. С. Кирсанова¹

¹*Институт астрономии РАН,*

²*Институт прикладной физики РАН*

В настоящей работе исследована область массивного звездообразования в молекулярном волокне WB 673, которое находится в спиральном рукаве Персея в направлении на антицентр Галактики. Нами были проведены наблюдения радиолиний аммиака на телескопе Эффельсберг (Германия) в направлении этого волокна для определения температуры газа.

GAS TEMPERATURE IN MOLECULAR FILAMENT WB 673

O. L. Ryabukhina^{1,2}, M. S. Kirsanova¹

¹*Institute of Astronomy RAS,* ²*Institute of Applied Physics RAS*

We studied the region of massive star formation in the filamentary cloud WB 673, which is located in the spiral arm Perseus in the direction of the Galaxy anticenter. We observed of ammonia radiolines at the Effelsberg telescope (Germany) in the direction of the filament to determine gas temperature.

Молекулярные облака в областях звездообразования имеют волонистую структуру, как показали многочисленные данные, полученные телескопом Гершель. Волокна наблюдаются на различных пространственных масштабах, содержат в себе плотные сгустки и звездообразующие ядра [1]. Роль волокон в формировании ядер и в процессе звездообразования в настоящее время активно исследуется как с помощью наблюдений, так и теоретически.

В работе анализируется область образования массивных звезд WB 673 — молекулярное волокно длиной около 25 пк, частично расположенное на периферии области ионизованного водорода S231 [2]. Волокно изучено в линиях изотопов монооксида углерода [3], однако для подробного исследования звездообразования молекулы CO

недостаточно, так как излучение в линиях СО указывает на наличие газа умеренной плотности. Кроме того, при низких температурах молекулы СО подвержены вымораживанию на пыль. Аммиак же является надежным трассером плотных сгустков, поскольку остается в газовой фазе в плотных (10^5 см^{-3}) и холодных молекулярных облаках [4]. Благодаря тому что инверсионные переходы аммиака возбуждаются за счет столкновений, эта молекула является надежным «термометром» плотного молекулярного газа [5].

В январе 2019 г. нами были проведены наблюдения линий аммиака в инверсионных переходах (1,1), (2,2) и (3,3) на 100-м телескопе Эффельсберг (Германия). Наблюдения проходили на частотах 23.69, 23.72 и 23.87 ГГц соответственно, в режиме «на лету» (on-the-fly). Обработка наблюдений была проведена с помощью стандартной процедуры. Используя приближение локального термодинамического равновесия, которое оправдано при работе с инверсионными переходами аммиака, мы произвели приближение линий сверхтонкой структуры функцией гаусса и определили температуру возбуждения линий и их оптическую толщину. По соотношению яркостей линий (1,1) и (2,2) были определены так называемая вращательная температура и затем, с помощью калибровочных графиков, кинетическая температура газа в волокне.

Библиографические ссылки

1. *André P., Men'shchikov A., Bontemps S. et al.* From filamentary clouds to prestellar cores to the stellar IMF: Initial highlights from the Herschel Gould Belt Survey // *Astron. Astrophys.* — 2010. — Vol. 518. — P. L102. 1005.2618.
2. *Kirsanova M. S., Salii S. V., Sobolev A. M. et al.* Molecular gas in high-mass filament WB673 // *Open Astronomy.* — 2017. — Vol. 26. — P. 99–105. 1711.01428.
3. *Ladeyschikov D. A., Kirsanova M. S., Tsvilev A. P., Sobolev A. M.* Molecular emission in dense massive clumps from the star-forming regions S231-S235 // *Astrophysical Bulletin.* — 2016. — Vol. 71. — P. 208–224. 1605.08917.
4. *Bergin E. A., Langer W. D.* Chemical Evolution in Preprotostellar and Protostellar Cores // *Astrophys. J.* — 1997. — Vol. 486, № 1. — P. 316–328.
5. *Danby G., Flower D. R., Valiron P. et al.* A recalibration of the interstellar ammonia thermometer // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1988. — Vol. 235. — P. 229–238.

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЙ ВОЗБУЖДЕНИЯ СЕРИИ ПЕРЕХОДОВ МЕТАНОЛА $J_1 - J_0 A^{-+}$ В МЕЖЗВЕЗДНОЙ СРЕДЕ

С. В. Салий, А. М. Соболев

*Астрономическая обсерватория
Уральского федерального университета*

Для 22 нижних переходов метанола серии $J_1 - J_0 A^{-+}$ (с $J \leq 22$) построены зависимости оптических толщин и яркостных температур от физических параметров: кинетической температуры (T_k) и концентрации (n_{H_2}) молекулярного водорода, удельной лучевой концентрации ($N_m/\Delta V$) и обилия (N_m/N_{H_2}) метанола. Показано, что все переходы серии в условиях, характерных для областей звездообразования ($T_k > 15$ K, $N_m/\Delta V > 10^8$ см⁻³с, $N_m/N_{H_2} > 10^{-8}$, n_{H_2} от 10^3 до 10^9 см⁻³), имеют состояния возбуждения не ниже квазитепловых. При $T_k = 150\text{--}600$ K, $N_m/\Delta V = 3 \times 10^8\text{--}3 \times 10^{12}$, $n_{H_2} = 10^3\text{--}10^9$ см⁻³ и $N_m/N_{H_2} = 3 \times 10^{-8}\text{--}3 \times 10^{-6}$ в переходах серии отмечается наличие инверсии населенностей уровней, что может приводить к незначительному мазерному усилению.

STUDY OF EXCITATION STATES OF METHANOL TRANSITION SERIES $J_1 - J_0 A^{-+}$ IN THE INTERSTELLAR MEDIUM

S. V. Salii, A. M. Sobolev

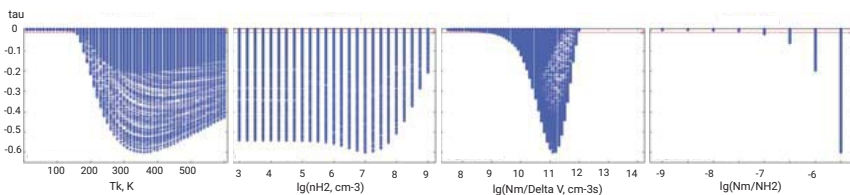
Astronomical observatory of Ural Federal University

For 22 lowest transitions of the methanol series $J_1 - J_0 A^{-+}$ (with $J \leq 22$) dependences are constructed of the optical depth and brightness temperature on physical parameters: kinetic temperature (T_k) and number density of molecular hydrogen (n_{H_2}), specific column density ($N_m/\Delta V$) and fractional abundance (N_m/N_{H_2}) of methanol. It was shown that all transitions of the series under conditions characteristic of star formation regions ($T_k > 15$ K, $N_m/\Delta V > 10^8$ cm⁻³s, $N_m/N_{H_2} > 10^{-8}$, n_{H_2} from 10^3 to 10^9 cm⁻³) have excitation states not lower than quasi-thermal. With $T_k = 150\text{--}600$ K, $N_m/\Delta V = 3 \times 10^8\text{--}3 \times 10^{12}$, $n_{H_2} = 10^3\text{--}10^9$ cm⁻³ and $N_m/N_{H_2} = 3 \times 10^{-8}\text{--}3 \times 10^{-6}$ in transitions of the series can occur inversion of level populations leading to weak maser amplification.

Метанол — это одна из широко наблюдаемых молекул в областях звездообразования. В ряде переходов в определенных условиях возникает инверсия населенностей уровней, что приводит к мазерному усилению. Известно большое количество мазерных переходов, однако мазерное усиление может проявляться и на неизвестном ранее переходе. Например, в объекте S255IR было обнаружено мазерное излучение в линии, соответствующей переходу $14_1 - 14_0 A^{-+}$ [1]. Открытие новых мазерных переходов расширяет возможности диагностики вещества в окрестности молодых звездных объектов.

На основе базы населенностей энергетических уровней метанола [2] построены зависимости модельных оптических толщин и яркостных температур линий, соответствующих переходам серии $J_1 - J_0 A^{-+}$ с $J \leq 22$, от физических параметров.

Получено, что все переходы серии в условиях, характерных для областей звездообразования, имеют состояния возбуждения не ниже квазитепловых, при этом при $T_k = 150-600$ K, $N_m/\Delta V = 3 \times 10^8 - 3 \times 10^{12}$, $n_{H_2} = 10^3 - 10^9$ см $^{-3}$ и $N_m/N_{H_2} = 3 \times 10^{-8} - 3 \times 10^{-6}$ модельные населенности уровней могут быть инвертированы (см. рисунок), что свидетельствует о возможности небольшого мазерного усиления в указанных интервалах физических параметров.



Диапазоны физических параметров с $\tau < 0$ для перехода $14_1 - 14_0 A^{-+}$

Работа поддержана грантом РФФИ (18-12-00193).

Библиографические ссылки

1. Zinchenko I., Liu S. Y., Su Y. N., Sobolev A. M. Detection of a new methanol maser line with ALMA // Astron. Astrophys. — 2017. — Vol. 606. — P. L6. 1709.08889.
2. Salii S., Parfenov S., Sobolev A. Updated Base of Methanol Energy Level Populations // Modern Star Astronomy. — 2018. — Vol. 1. — P. 276–279.

ВЛИЯНИЕ БЛИЗКОГО ПРОХОЖДЕНИЯ С СОЛНЦЕМ НА АСТЕРОИД (196256) 2003 EH1 ПОСЛЕ 1000 ГОДА

Г. Е. Самбаров, Т. Ю. Галушина, О. М. Сюсина

Томский государственный университет

В данной работе рассматриваются исследование движения астероида (196256) 2003 EH1 и особенности его динамики: тесные сближения с Солнцем, орбитальные и вековые резонансы с планетами и др.

INFLUENCE OF CLOSE APPROACH WITH THE SUN ON THE ASTEROID (196256) 2003 EH1 AFTER 1000 YEAR

G. E. Sambarov, T. Yu. Galushina, O. M. Syusina

Tomsk State University

This paper considers the study of the motion of the asteroid (196256) 2003 EH1 and the features of its dynamics, such as close approaches with the Sun, orbital and secular resonances with planets, etc.

Астероид (196256) 2003 EH1 привлекает внимание ученых по ряду причин, в качестве основной из которых следует упомянуть то, что данный астероид является прародителем метеороидного потока Квадрантиды [1], но механизм образования потока не совсем ясен [1, 2]. Особую актуальность исследованиям динамики 2003 EH1 придают его сближение с Землей в сентябре 2019 г. и появление новых наблюдений, что будет способствовать уточнению орбиты и физических параметров объекта.

Для выяснения возможного сценария появления Квадрантид мы исследовали вероятностную орбитальную эволюцию его прародителя в прошлое с помощью новой версии программного комплекса ИДА [3], дополненной возможностью определения параметра эффекта Ярковского и автоматического построения графиков. В ходе исследования выявлены сближения с планетами и Солнцем, орбитальные и вековые резонансы с Юпитером.

Полученные результаты показывают, что в течение последних нескольких сотен лет перигелийное расстояние для астероида (196256) 2003 EH1 и его клонов постепенно увеличивалось — с 0.3 а. е. (в 1000 году) до 1.2 а. е. (в настоящее время). Такое небольшое перигелийное расстояние в прошлом могло бы привести к полной дегазации кометы [4], объяснив, почему астероид (196256) 2003 EH1 является неактивной кометой. Существует и другое разумное объяснение этому эффекту: либо частые сближения с Юпитером [1], либо столкновения с троянскими астероидами на какое-то время активировали родителя [2, 5], а впоследствии активность снова снизилась до нуля. Однако есть и другой разумный сценарий, где астероид (196256) 2003 EH1 образовался путем распада кометы или откололся от нее.

В результате тесного прохождения с Солнцем разумно ожидать, что поверхностные слои должны были испариться при высоких температурах, достигнутых в прошлом перигелии, что привело в настоящем к инертному состоянию. Новые наблюдения и расширенная модель, включающая влияние эффекта Ярковского, светового давления может дать более глубокие физические описания этого состояния в прошлом.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-72-10022).

Библиографические ссылки

1. *Sambarov G. E., Galushina T. Yu., Syusina O. M.* Analysis of the dynamic relationship between the asteroid (196256) 2003 EH1 and comets C/1490 Y1 & C/1385 U1 // *Proceedings of the IMC, Pezinok-Modra.* — 2018. — P. 119—122.
2. *Abedin A., Spurny P., Wiegert P. et al.* On the age and formation mechanism of the core of the Quadrantid meteoroid stream // *Icarus.* — 2015. — Vol. 261.
3. *Galushina T., Bykova L., Letner O., Baturin A.* IDA software for investigating asteroid dynamics and its application to studying the motion of 2012 MF7 // *Astronomy and Computing.* — 2019. — Vol. 26.
4. *Kasuga T., Jewitt D.* Physical observations of (196256) 2003 EH1, presumed parent of the Quadrantid meteoroid stream // *The Astronomical Journal.* — 2015. — Vol. 150.
5. *Wiegert P., Brown P.* The Quadrantid meteoroid complex // *Icarus.* — 2005. — Vol. 179.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ
ПАРЫ АСТЕРОИДОВ (21436) СНАОҮІСНІ — (334916)
2003 ҮК39**

В. С. Сафронова, Э. Д. Кузнецов
Уральский федеральный университет

Численно исследована динамическая эволюция пары астероидов (21436) Chaoyichi — (334916) 2003 YK39, движущихся по близким орбитам. Для оценки возраста пары анализировались условия тесных сближений астероидов между собой и поведение метрик Холшевикова. Рассмотрены варианты эволюции орбит, различающихся скоростью дрейфа большой полуоси, обусловленного влиянием эффекта Ярковского. Минимальные оценки возраста пары составляют от 37 до 68 тыс. лет и зависят от скорости дрейфа больших полуосей орбит астероидов.

**DYNAMICAL EVOLUTION OF ASTEROID PAIR (21436)
СНАОҮІСНІ — (334916) 2003 YK39**

V. S. Safronova, E. D. Kuznetsov
Ural Federal University

The dynamic evolution of the pair of asteroids (21436) Chaoyichi — (334916) 2003 YK39 moving in close orbits has been studied numerically. To estimate the age of the pair, the conditions of close approaches of asteroids to each other and the behavior the Kholshevnikov metrics were analyzed. Variants of the evolution of orbits differing in the rate of the semimajor axis drift due to the influence of the Yarkovsky effect are considered. Minimum estimates of the age of the pair range from 37 to 68 thousand years and depend on the rate of the semimajor axis drift of the asteroid orbits.

Астероиды (21436) Chaoyichi и (334916) 2003 YK39 движутся по очень близким орбитам. Возможно, что ранее они составляли одно тело. Для оценки возраста пары астероидов было выполнено численное моделирование с использованием программы Orbit9 комплекса OrbFit. Интервалы интегрирования составили 1 млн и 70 тыс. лет в прошлое. Для учета влияния эффекта Ярковского для каждого

da/dt_{21436} , а. е./млн лет	da/dt_{334916} , а. е./млн лет	Δt , годы	Δr , км	R_{Hill} , км	v_{rel} , м/с	V_{esc} , м/с
0	0	68316	479	396	0.094	0.054
$-7.3 \cdot 10^{-5}$	0	36969	700	396	0.089	0.045

астероида были получены оценки максимума модуля скорости дрейфа большой полуоси $|da/dt|_{max}$. Применялся подход [1], основанный на калибровке скорости дрейфа большой полуоси орбиты астероида da/dt на основе физических и орбитальных параметров астероида (101955) Bennu. Численное моделирование выполнялось для $da/dt = 0, \pm 1/2 |da/dt|_{max}$ и $\pm |da/dt|_{max}$.

При оценке возраста пары использовались метрики Холшевникова ρ_2 и ρ_5 [2], а также анализировались условия сближений астероидов между собой. Для каждого тесного сближения астероидов проверялось выполнение условий [3], соответствующих процессу образования пары в результате дробления родительского астероида: $\Delta r < 10R_{Hill}$, $v_{rel} < 5V_{esc}$, где Δr — относительное расстояние между астероидами; R_{Hill} — радиус сферы Хилла более массивного астероида; v_{rel} — относительная скорость; V_{esc} — вторая космическая скорость относительно более массивного астероида. В таблице приведены минимальные оценки возраста пары при различных значениях скоростей дрейфа больших полуосей астероидов.

На интервале времени 1 млн лет выявлены сближения каждого из астероидов с Марсом. В дальнейшем планируется исследовать возможность прохождения астероидов через резонансы.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-02-00015.

Библиографические ссылки

1. Spoto F., Milani A., Knežević Z. Asteroid family ages // Icarus. — 2015. — Vol. 257. — P. 275–289.
2. Kholshchikov K. V., Kokhirova G. I., Babadzhanyan P. B., Khamroev U. H. Metrics in the space of orbits and their application to searching for celestial objects of common origin // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2016. — Vol. 25. — P. 2275–2283.
3. Pravec P., Fatka P., Vokrouhlický D. et al. Asteroid pairs: A complex picture // Icarus. — 2019. — Vol. 333. — P. 429–463.

ЗВЕЗДНОЕ СКОПЛЕНИЕ ГИАДЫ И НОВЫЕ КОМЕТЫ

М. Д. Сизова¹, Е. С. Постникова¹, А. П. Демидов²,
Н. В. Чупина¹, С. В. Верещагин¹

¹*Институт астрономии Российской академии наук,*

²*Центральная аэрологическая обсерватория*

Известно, что скопление Гиады растянуто вдоль пространственной орбиты на десятки парсек. По нашим оценкам, 0.85 млн лет назад было сближение скопления с Солнцем до 24.8 пк. Возможные смещения перигелия орбит малых тел в облаке Оорта делают часть из них наблюдаемыми кометами.

HYADES STAR CLUSTER AND A NEW COMETS

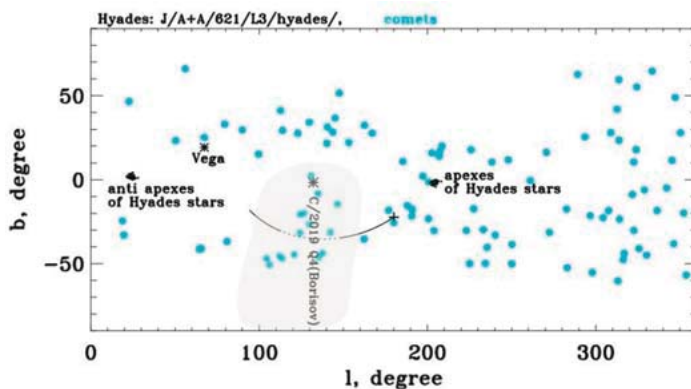
М. D. Sizova¹, E. S. Postnikova¹, A. P. Demidov²,
N. V. Chupina¹, S. V. Vereshchagin¹

¹*Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences,* ²*Central Aerological Observatory*

The Gaia DR2 data revealed that the Hyades star cluster is stretched along the spatial orbit for tens of parsecs. According to our estimates, 0.85 million years ago there was an approach of the cluster with the Sun up to 24.8 pc. The displacements of the perihelions of small bodies orbits in the outer Oort cloud turned them into observable comets.

По данным Gaia DR2 получены убедительные доказательства существования приливных хвостов скопления Гиад [1]. Интегрирование движения орбит центра скопления и Солнца показало, что в интервале от 0.8 до 2 млн лет назад было сближение на расстояние приблизительно 24.8 пк. С другой стороны, положения Гиад на LB-диаграмме совпадают с областью положения афелиев новых комет [2] (выделена серым цветом на рисунке). Область выбрана с учетом влияния гипотетического спутника Солнца внутри облака Оорта. На рисунке показаны положения афелиев новых комет (наклоны орбит i близки к 103°) и Гиад на 3 млн лет назад (черным штрих-пунктиром), а также некоторые примечательные точки.

© Сизова М. Д., Постникова Е. С., Демидов А. П., Чупина Н. В.,
Верещагин С. В., 2020



LB-диаграмма

Величина приращения скорости малого тела ΔV_{\perp} при заданном расстоянии малого тела от Солнца (0.5 пк) в зависимости от массы скопления M_{cl} равна $\Delta V_{\perp} = 0.1 \cdot M_{cl} / r_{\odot}^2$, где r_{\odot} — величина сближения Гиад и Солнца [3].

Показано, что Гиады (масса $400 M_{\odot}$), приблизившись к Солнцу, приводят к возрастанию скоростей малых тел приблизительно на 0.1 м/с. Скорость отрыва здесь 133 м/с. Поиски слабых членов скопления, учет массы двойных, коллективного влияния звезд и звезд потока Гиад позволят увеличить точность полученной оценки.

Авторы благодарны В. В. Емельяненко за полезные идеи и советы, Б. М. Шустову — за полезные замечания.

Работа М. Д. Сизовой частично поддержана Российским научным фондом (РНФ, 17-12-01441)

Библиографические ссылки

1. *Meingast S., Alves J.* Extended stellar systems in the solar neighborhood. I. The tidal tails of the Hyades // *Astron. Astrophys.* — 2019. — Vol. 621. — P. L3. 1811.04931.
2. *Matese J. J., Whitmire D. P.* Persistent evidence of a jovian mass solar companion in the Oort cloud // *Icarus.* — 2011. — Vol. 211, № 2. — P. 926—938. 1004.4584.
3. *Torres S., Cai M. X., Brown A. G. A., Zwart S. P.* Galactic tide and local stellar perturbations on the Oort cloud: creation of interstellar comets // *Astron. Astrophys.* — 2019. — Vol. 629. — P. A139. 1906.10617.

**ДИНАМИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ АСТЕРОИДОВ,
ИСПЫТЫВАЮЩИХ СОВМЕСТНОЕ ВЛИЯНИЕ
ЭФФЕКТА ЛИДОВА—КОЗАИ И ЭФФЕКТА
ЯРКОВСКОГО**

П. В. Скрипниченко, Э. Д. Кузнецов
Уральский федеральный университет

Исследована динамическая эволюция орбит астероидов, испытывающих влияние эффекта Лидова—Козаи при одновременном учете эффекта Ярковского. Были отобраны 160 астероидов, элементы орбит которых удовлетворяют условию существования либраций аргумента перигентра (необходимое условие проявления эффекта Лидова—Козаи). Для большинства объектов рассматривалось семь вариантов дрейфа большой полуоси под действием эффекта Ярковского: 0 , $\pm 1 \times 10^{-5}$, $\pm 1 \times 10^{-4}$, $\pm 1 \times 10^{-3}$ а. е./ (млн лет). В случаях если учет эффекта Ярковского приводил к существенным изменениям элементов орбит астероидов, количество вариантов дрейфа увеличивалось до 100 с равным шагом внутри интервала $(-1 \times 10^{-3}, +1 \times 10^{-3})$ а. е./ (млн лет). Рассмотрены тесные сближения (менее 0.1 а. е.) с планетами земного типа и менее 1 а. е. с планетами-гигантами.

**DYNAMIC EVOLUTION OF ASTEROIDS
EXPERIENCING THE COMBINED INFLUENCE
OF THE LIDOV—KOZAI EFFECT
AND THE YARKOVSKY EFFECT**

P. V. Skripnichenko, E. D. Kuznetsov
Ural Federal University

© Скрипниченко П. В., Кузнецов Э. Д., 2020

This paper presents results of research of asteroids, which experienced the Lidov—Kozai effect with a different model of perturbation factors distinguished by drift velocity of semimajor axis, induced by the Yarkovsky effect. Dynamic properties of 160 asteroids which have orbital elements that fulfil the condition of libration of the argument of periapsis. Movement of objects was modeled with the use of the program Orbit9 from OrbFit software. Elements of nominal orbits of asteroids from AstDys database were used as initial in integrating, equations for movement of eight planets and Pluto were integrated jointly. For most objects, evolution variants contained seven values for the semimajor axis drift induced by the Yarkovsky effect $0, \pm 1 \times 10^{-5}, \pm 1 \times 10^{-4}, \pm 1 \times 10^{-3}$ au/Myr. Close approaching (less than 0.1 au) to terrestrial planets to outer planets (less than 1 au) was examined.

Исследована динамическая эволюция орбит астероидов, испытывающих влияние эффекта Лидова—Козаи при одновременном учете эффекта Ярковского. Рассмотрены сценарии эволюции, различающиеся скоростью дрейфа большой полуоси орбиты, обусловленного влиянием эффекта Ярковского. Были отобраны 160 астероидов, элементы орбит которых удовлетворяют условию существования либраций аргумента перицентра g (необходимое условие проявления эффекта Лидова—Козаи): $c_1 < 0.6$ и $c_2 < 0$, где $c_1 = (1 - e^2) \cos^2 i$ и $c_2 = e^2(2/5 - \sin^2 i \sin^2 g)$ — интегралы Лидова—Козаи; e, i — эксцентриситет и наклон орбиты. Движение объектов моделировалось с помощью программы Orbit9 комплекса OrbFit. Элементы номинальных орбит астероидов из базы данных AstDys использовались в качестве начальных при интегрировании. Совместно интегрировались уравнения движения восьми больших планет и Плутона. Для большинства объектов рассматривалось семь вариантов дрейфа большой полуоси под действием эффекта Ярковского: $0, \pm 1 \times 10^{-5}, \pm 1 \times 10^{-4}, \pm 1 \times 10^{-3}$ а. е./ (млн лет). В случаях если учет эффекта Ярковского приводил к существенным изменениям элементов орбит астероидов, количество вариантов дрейфа увеличивалось до 100 с равным шагом внутри интервала $(-1 \times 10^{-3}, +1 \times 10^{-3})$ а. е./ (млн лет). Рассмотрены тесные сближения (менее 0.1 а. е.) с планетами земного типа и менее 1 а. е. с планетами-гигантами. Влияние эффекта Ярковского приводит к изменению условий сближения астероидов с планетами, что, в свою очередь, может приводить к изменению режима динамической эволюции астероидов, определяемого влиянием эффекта Лидова—Козаи.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-02-00015.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЛАСТЕЙ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ В ГАЛАКТИКАХ NGC 1512, NGC 4618, NGC 4395 И NGC 660

К. И. Смирнова¹, Д. З. Вибе²

¹*Уральский федеральный университет,*

²*Институт астрономии РАН*

В работе мы исследовали несколько галактик: NGC 660 — галактика с полярным кольцом, NGC 4618 — галактика со смещенным баром, NGC 1512, NGC 4395 — взаимодействующие галактики. Во всех этих галактиках присутствует разделение областей звездообразования на две группы — с более низкими и более высокими потоками в инфракрасном диапазоне, что может быть связано с разделением областей звездообразования на две группы по возрастам.

STUDY OF STAR-FORMING REGIONS IN GALAXIES NGC 1512, NGC 4618, NGC 4395 AND NGC 660

K. I. Smirnova¹, D. S. Wiebe²

¹*Ural Federal University,* ²*Institute of Astronomy of the RAS*

In this work, we investigated several galaxies: galaxy NGC 660 with a polar ring, offset bar galaxy NGC 4618, and interacting galaxies NGC 1512 and NGC 4395. In all these galaxies, there is a separation of star-forming regions into two groups, with lower and higher fluxes in the infrared range, which may reflect division of star-forming regions into two age groups.

В галактике с полярным кольцом NGC 660, исследованной в работе [1], нами было найдено различие потоков в инфракрасном (ИК) диапазоне для областей звездообразования (ОЗО) в кольце и диске галактики. С точки зрения звездообразования (ЗО) эти объекты интересны тем, что сценарии их формирования могут приводить к разному возрасту диска и кольца, т. е. в кольце могут наблюдаться более молодые, чем в диске, ОЗО. Больше мы не смогли найти ни одного объекта для исследования среди галактик с полярными

кольцами из-за различного рода проблем (большое расстояние до объекта, мало наблюдательных данных и т. д.). В связи с этим мы обратились к другим объектам, в процессе эволюции которых могут возникать условия, способствующие образованию новых волн ЗО.

Подходящими кандидатами оказались галактики со смещенными барами, в которых наблюдается смещение центральной перемычки относительно фотометрического и/или кинематического центров диска, которое может быть вызвано сильным приливным воздействием или столкновением двух галактик с последующим слиянием, а также взаимодействующие галактики, где само взаимодействие галактик может вызвать волну ЗО в одной из них.

Всего мы исследовали четыре галактики и получили следующие результаты. Разделение ОЗО по ИК-потокам, подобное разделению в галактике NGC 660, обнаруживается также и в других галактиках. Причем в других галактиках полученные данные позволили выявить это разделение во всех трех диапазонах ИК-спектра: ближнем, среднем и дальнем. Данное разделение мы связываем с различным возрастом исследуемых ОЗО. Низкие ИК-потоки могут говорить о том, что ЗО в этих областях началось не так давно.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-32-50063.

Библиографические ссылки

1. *Smirnova K. I., Wiebe D. S., Moiseev A. V.* Star-forming complexes in the polar ring galaxy NGC660 // *Open Astronomy*. — 2017. — Vol. 26, № 1. — P. 88–92. 1712.00956.

ПРОГРАММНО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ УЧЕТА ЭФФЕКТА ЯРКОВСКОГО И СВЕТОВОГО ДАВЛЕНИЯ В ЗАДАЧАХ ДИНАМИКИ АСТЕРОИДОВ

О. М. Сюсина, Т. Ю. Галушина

Томский государственный университет

В данной работе на примере астероидов, имеющих малое перигелийное расстояние, проведено исследование влияния на вероятностную модель движения объектов малых возмущающих параметров, таких как эффект Ярковского и световое давление.

SOFTWARE FOR TAKING INTO ACCOUNT THE YARKOVSKY EFFECT AND LIGHT PRESSURE IN THE PROBLEM OF ASTEROIDS DYNAMICS

O. M. Syusina, T. Yu. Galushina

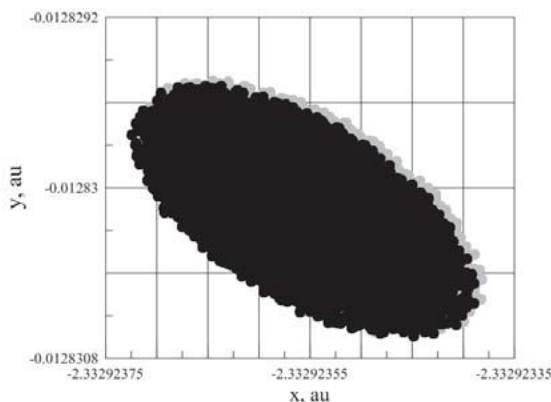
Tomsk State University

In this paper on the example of asteroids with a small perihelion distance we study the influence of perturbing parameters, such as the Yarkovsky effect and light pressure, on the probabilistic model of objects motion.

Исследование вероятностной эволюции астероидов, сближающихся с Землей, является одной из важных задач небесной механики. Для ее решения необходимо построить оптимальную модель возмущающих ускорений, воздействующих на объект. Менее полная модель, чем это необходимо, может привести к тому, что объект не попадет в доверительную область и, как следствие, к ошибочным расчетам вероятности столкновения объекта с Землей.

Для объектов, имеющих малое перигелийное расстояние, особое значение имеет оценивание влияния таких возмущающих факторов, как эффект Ярковского и световое давление. Для решения данной задачи нами была осуществлена модификация имеющегося у нас программного комплекса, предназначенного для исследования динамики астероидов. В рамках настоящей работы программный комплекс был усовершенствован и в модель сил добавлены эффект Ярковского и световое давление. Для ряда астероидов, сближающихся

с Землей, было рассмотрено три вида моделей (полная, без учета эффекта Ярковского, без учета светового давления). Точность модели движения оценивалась с помощью показателя смещения доверительных областей [1], построенных для различных моделей движения объекта. В качестве порогового было взято значение $\bar{\varepsilon} = 0.01$. Так, например, для астероида 2002 AJ129 в пределах мерного интервала при неучете светового давления показатель ε равен 0.002, а при неучете эффекта Ярковского — 0.27. Таким образом, для астероида 2002 AJ129 значение показателя ε при неучете возмущения от эффекта Ярковского превышает пороговое значение, что означает, что данное возмущающее ускорение следует учитывать при исследовании движения этого объекта. Наглядное смещение начальных доверительных областей приведено на рисунке. Здесь черным цветом обозначена начальная доверительная область, построенная по граничной поверхности с использованием полной модели возмущающих сил, серым цветом — без учета возмущения от эффекта Ярковского.



Начальные доверительные области для астероида 2002 AJ129

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ в рамках научного проекта № 19-72-10022.

Библиографические ссылки

1. Сюсина О. М., Черницын А. М., Тамаров В. А., Самбаров Г. Е. Способ оценки влияния модели сил на систематическую ошибку определения областей возможных движений астероидов // Изв. вузов. Физика. — 2013. — Т. 56. — С. 235–237.

СПЕКТРАЛЬНЫЕ КЛАССЫ ИОНИЗУЮЩИХ ЗВЕЗД И МОРФОЛОГИЯ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОБЛАСТЕЙ HII

А. П. Топчиева

Институт астрономии Российской академии наук

Представлены данные ранее разработанного каталога, включающего 99 областей ионизованного водорода (HII). Отражены результаты определения потоков в инфракрасном (ИК) и радиоконтинуумах в направлении на области HII. Проведено сравнение оценок ИК-потоков с другими каталогами. Определены примерные спектральные классы ионизирующих звезд 42 областей, для которых известны оценки расстояний.

SPECTRAL TYPES OF IONIZING STARS AND THE INFRARED MORPHOLOGY OF HII REGIONS

A. P. Topchieva

Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences

A previously developed catalog is presented, which includes 99 regions of ionized hydrogen (HII). Results of the flux measurements in the infrared (IR) and radio continua in the direction of the HII region are presented. Estimated fluxes of IR emission are compared to results from other catalogs. Spectral types of ionizing stars are determined for 42 regions with distance estimates available.

В работах [1, 2] сформирован каталог данных по областям HII, который является превосходной базой для сравнения с результатами теоретических моделей. В данной работе представлены данные о потоках излучения областей HII. Карты спектрального распределения энергии сопоставляются с базами данных каталогов [3, 4]. Выполнены оценки спектральных классов ионизирующих звезд в 42 областях, для которых известны оценки расстояний. Рассмотрена взаимозависимость потоков в ИК- и радиодиапазонах. Установлено, что потоки в ИК-диапазоне на длинах волн 8, 24 и 160 мкм возрастают с увеличением потока на 20 см. Поток на 160 мкм увеличивается с ростом

значения эффективной температуры ионизирующей звезды. Это может означать, что более горячие звезды окружены холодными пылевыми оболочками ббльшей массы. В случае излучения на 8 и 24 мкм невозможно различить влияние двух параметров — массы и температуры пылевой оболочки вокруг области HII — на значение ИК-потоков $F_{8\text{mkm}}$ и $F_{24\text{mkm}}$. Помимо этого обобщены результаты, полученные на основании ранее проделанных работ.

Работа поддержана грантом РФФИ 17-02-00521.

Библиографические ссылки

1. *Topchieva A., Wiebe D., Kirsanova M., Krushinsky V.* The Evolution of Dust and Infrared Radiation in HII Regions. — 2017. — Vol. 510, Ser. Astronomical Society of the Pacific Conference Series. — P. 98.
2. *Topchieva A., Wiebe D., Kirsanova M. S.* Global photometric analysis of galactic HII regions // ArXiv e-prints. — 2018. 1801.04440.
3. *Bufano F., Leto P., Carey D. et al.* First Extended Catalogue of Galactic bubble infrared fluxes from WISE and Herschel surveys // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2018. — Vol. 473. — P. 3671–3692. 1711.06263.
4. *Anderson L. D., Bania T. M., Balser D. S. et al.* The WISE Catalog of Galactic H II Regions // The Astrophysical Journal Supplement. — 2014. — Vol. 212. — P. 1. 1312.6202.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ОБЛАСТЯХ НII

А. П. Топчиева

Институт астрономии Российской академии наук

Мы представляем потоки от внутренних частей и внешних колец инфракрасных кольцевых туманностей на семи длинах волн от 8 до 500 мкм на основе данных *Spitzer* и *Herschel*. Определены спектральные индексы, являющиеся лучшими индикаторами температуры пыли и массовой доли мелких пылинок.

DETERMINATION OF PHYSICAL PARAMETERS OF INFRARED RADIATION IN NII REGIONS

A. P. Topchieva

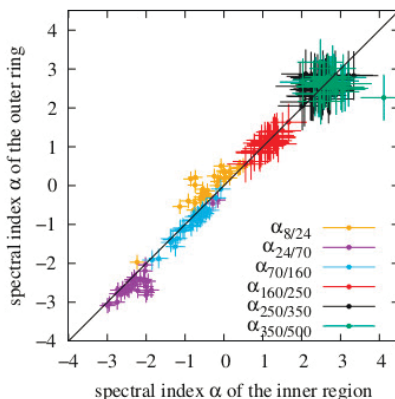
Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences

We present fluxes from inner parts and outer rings of the IR ring nebulae at seven wavelengths from 8 to 500 μm based on *Spitzer* and *Herschel* data. We define spectral indices, which are the best indicators of dust temperature and small dust mass fraction.

Благодаря инфракрасным (ИК) наблюдениям с помощью космических телескопов *Spitzer*, *WISE*, *Akari* и *Herschel* было обнаружено более 8 000 инфракрасных кольцевых туманностей (ИККТ). Большинство из этих объектов, примерно 86 %, идентифицированы как области НII вокруг массивных ОВ-звезд. Особенностью ИККТ является наличие внешнего кольца, видимого в ближнем ИК-диапазоне, в среднем ИК-диапазоне и в дальнем ИК-диапазоне. Излучение на разных длинах волн может генерироваться в основном пылевыми компонентами определенного размера. Например, на 8 мкм излучение идет от мелкой стохастически нагретой пыли, а в длинноволновом диапазоне излучает крупная и холодная пыль.

Мы определили спектральные индексы для каждой пары двух соседних частот (см. рисунок). В спектральных индексах $\alpha_{8/24}$, $\alpha_{24/70}$, $\alpha_{70/160}$ четко различаются внутренняя и внешняя часть объекта. Индекс $\alpha_{8/24}$ неинформативен в отношении температуры пыли, но отражает относительное содержание полициклических ароматических

углеводородов (ПАУ) и крупной горячей пыли. Величина индексов $\alpha_{24/70}$ и $\alpha_{70/160}$ определяется в основном излучением, приходящим от оболочки. Индекс $\alpha_{24/70}$ сложно использовать как индикатор температуры пыли, а вот $\alpha_{70/160}$ может им являться, так как в этом диапазоне в основном светит крупная и холодная пыль.



Спектральный индекс для внутренней и внешней части ИККТ

Мы также использовали спектральные индексы в объектах выборки, чтобы проследить разницу в физических условиях внутри и снаружи областей НII. Используя данные о потоках в 32 объектах [1], мы показываем, что их морфология скорее сферическая, чем плоская. Индекс $\alpha_{70/160}$ является наиболее подходящим индикатором температуры пыли во внешней оболочке (20–30 K). Отмечено, что повышенное значение $\alpha_{8/24}$ коррелирует с меньшей интенсивностью на 70 мкм. Это указывает, что ПАУ действительно могут образовываться из-за разрушения пыли. Эти данные важны для последующего теоретического моделирования и определения эволюции пыли в областях НII и их оболочках.

Работа поддержана грантом РФФИ 18-32-00384 и грантом Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС».

Библиографические ссылки

1. *Topchieva A., Wiebe D., Kirsanova M., Krushinsky V.* The Evolution of Dust and Infrared Radiation in HII Regions. — 2017. — Vol. 510, Ser. Astronomical Society of the Pacific Conference Series. — P. 98.

УНОС АСТЕРОИДНЫХ ПЫЛИНОК ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

П. М. Трофимов

Челябинский государственный университет

Разработана трехмерная численная модель движения пылевой частицы. Уравнение движения частицы учитывает гравитационное воздействие Солнца и Юпитера, давление солнечного излучения, эффект Пойнтинга—Робертсона и солнечный ветер. С помощью разработанной модели исследуется орбитальная эволюция пылевых частиц, источником которых являются астероиды главного пояса. Получено количество покидающих Солнечную систему частиц в зависимости от размера и состава.

THE ESCAPE OF ASTEROID DUST PARTICLES DUE TO SOLAR RADIATION

P. M. Trofimov

Chelyabinsk State University

A numerical three-dimensional model of the motion of a dust particle is developed. The equations of particle motion include: the gravity of the Sun and Jupiter, the solar radiation pressure, the Poynting—Robertson drag and the solar wind. Using the developed model, the orbital evolution of dust particles which flying away from the asteroids of the main belt is investigate [1]. The dependence of particle sizes and materials on the number of particles leaving the solar system is obtained.

В 2010 г. японский космический аппарат Хаябуса закончил свою миссию по исследованию астероида Итокава (25143) и доставил на Землю образцы астероидного грунта. Изучая полученный грунт и фотографии астероида, японские ученые пришли к выводу, что Итокава теряет вещество со своей поверхности со скоростью нескольких десятков сантиметров в год [2]. Это привело исследователей к заключению, что время жизни астероида будет составлять 0.1—1 млрд лет. Таким образом, было показано, что вследствие эффектов эрозии астероиды теряют вещество со своей поверхности.

При подъеме пылинки над астероидом она попадает под действие давления излучения Солнца, которое вызывает изменение орбиты частицы в сравнении с материнским телом. Эффект Пойнтинга—Робертсона в процессе эволюции орбиты вызывает потерю углового момента частицы, что приводит к ее падению по спирали на Солнце. Из-за постоянного изменения орбитальных параметров частица может попасть на нестабильную орбиту, причиной нестабильности орбиты является гравитация планет. Результатом орбитальной эволюции пылинок могут стать три события: сгорание на Солнце, приобретение второй космической скорости и последующий вылет за пределы Солнечной системы, падение на какое-либо небесное тело Солнечной системы.

Моделируя начальные условия для частиц, вылетающих с астероидов главного пояса, с учетом гравитации Юпитера и Солнца и радиационных эффектов со стороны Солнца, мы получили зависимость параметра, определяющего размер и состав пылинок (коэффициент β) от результата их орбитальной эволюции. Получены зависимости коэффициента β и времени орбитальной эволюции от большой полуоси, эксцентриситета и орбитального наклона.

Библиографические ссылки

1. Горькавый Н. Н. О происхождении главного пояса астероидов // Изв. КРАО. — 2018. — Т. 114. — С. 67—73.
2. Nagao K., Okazaki R., Nakamura T. et al. Irradiation History of Itokawa Regolith Material Deduced from Noble Gases in the Hayabusa Samples // Science. — 2011. — Vol. 333. — P. 1128—1131.

МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ АСТЕРОИДА В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

В. Ш. Шайдулин

Санкт-Петербургский государственный университет

Представлен следующий этап развития численной модели поступательно-вращательного движения астероида в нестационарном гравитационном поле Солнечной системы. Модель позволяет учитывать различные негравитационные ускорения. В качестве примера рассмотрен эффект Ярковского.

MODEL OF ASTEROID MOTION IN THE SOLAR SYSTEM

V. Sh. Shaidulin

Saint Petersburg State University

The next stage of development of the numerical model of asteroid's rotation translational motion in Solar system's nonstationary gravitational field is presented. The model let you consider various non-gravitational accelerations. As an example, the Yarkovsky effect is considered.

Работа продолжает тему исследования поступательно-вращательного движения астероида в рамках модели абсолютно твердого тела, изложенной автором на конференции «Физика космоса» 2019 г. [1].

Ныне астероид движется в нестационарном гравитационном поле Солнечной системы и может время от времени тесно сближаться с планетами и заметно изменять орбиту. Астероид освещен солнечными лучами, и если световое давление может не играть большой роли, то мировым научным сообществом признается, что эффект Ярковского, связанный с нагревом и последующим остыванием поверхностных слоев, вызывает главное негравитационное ускорение, которое может испытывать астероид в пределах орбиты Марса (примерно). Численная модель движения астероида, предлагаемая в этой работе, старается корректно учесть перечисленные эффекты и

опирается на возможности современных компьютеров, позволяющих проводить часть вычислений параллельно.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-12-00050.

Библиографические ссылки

1. *Шайдулин В. Ш.* Исследование вращения астероида как твердого тела // Физика космоса : тр. 48-й Международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 28 янв. — 1 февр. 2019 г. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2019. — С. 205.

ОТКРЫТИЕ ПЕРЕМЕННЫХ ЗВЕЗД В ПОЛЯХ АКТИВНЫХ ЯДЕР ГАЛАКТИК

В. А. Добролюбова¹, С. В. Назаров^{1,2}

¹ *Севастопольский государственный университет,* ² *Крымская астрофизическая обсерватория*

Анализ архивных кадров, полученных в ходе мониторинга активных ядер галактик на 70-см телескопе АЗТ-8 в Крымской астрофизической обсерватории, позволил выявить ряд неизвестных ранее переменных звезд. Для обработки использовалось специализированное программное обеспечение Vast. В результате работы в международной базе данных VSX были зарегистрированы восемь переменных звезд.

DISCOVERY OF VARIABLE STARS IN THE FIELDS OF ACTIVE GALACTIC NUCLEI

V. A. Dobrolyubova¹, S. V. Nazarov^{1,2}

¹*Sevastopol State University,* ²*Crimean Astrophysical Observatory*

An analysis of archival data that we obtained during monitoring of active galactic nuclei with 70-cm telescope in Crimean Astrophysical Observatory revealed a number of new variable stars. The investigation was made by variability search toolkit named Vast. All discovered objects were registered in international database VSX.

Целью данного исследования является поиск новых переменных звезд и определение их основных параметров. Наблюдения проводились в Крымской астрофизической обсерватории, расположенной на высоте около 600 м, на южном склоне горы Сель-Бухра. Использовались данные, полученные в ходе мониторинга активных ядер галактик в отделе внегалактических исследований и гамма-астрономии при помощи зеркального телескопа АЗТ-8 ($D = 70$ см, $F = 282$ см).

При изучении снимков с помощью программы VaST (<http://scan.sai.msu.ru/vast/>) были обнаружены переменные звезды в пяти разных площадках. Сведения о них содержатся в таблице.

Сведения об открытых переменных звездах

Обозначение, автор	RA, Dec	Тип	Период, сутки	Амплитуда, Vmag
USNO-A2.0 0750-18886826 Nazarov S. UCAC4 662-103422	19 43 04.1 -10 14 20.7	RRAB	0.5253	15.75—16.87
Nazarov S., Kutkov O. UCAC4 850-013382	22 02 18.1 +42 15 07.9	EW	0.3428	16.55—16.85
Nazarov, S. Kutkov, O. UCAC4 849-013401	18 40 14.07 +79 49 28.1	EA	0.5371	16.65—17.35
Nazarov S., Kutkov O. UCAC4 682-039821	18 42 24.8 +79 37 39.6	EW	0.2695	16.44—17.19
Nazarov S., Kutkov O. UCAC4 683-041980	05 54 52.27 +46 23 57.5	GDOR	1.5992	14.21—14.25
Nazarov S., Kutkov O. USNO-A2.0 1350-06265090	05 54 45.91 +46 24 11.9	GDOR	0.6438	16.07—16.12
Nazarov S., Kutkov O. GSC 05760-01389	05 54 32.79 +46 27 33.9	EW	0.3303	17.45—17.75
Doroshenko et al. [1]	20 43 58.64 -10 41 37.0	RS	3.1785	13.96—14.09

Далее производилась проверка звезд на исследованность с помощью каталога VSX (AAVSO) по найденным нами координатам, в результате чего было обнаружено, что ни одна из звезд зарегистрирована не была. Однако в базе данных ADS есть публикация Дорошенко и соавторов [1] с указанием на переменность GSC 05760-01389, но без определения основных параметров. Таким образом, в ходе работы были найдены восемь переменных звезд и определены их тип, период и амплитуда изменения блеска. Полученные данные внесены в каталог VSX (AAVSO) [2].

Библиографические ссылки

1. *Doroshenko V. T., Sergeev S. G., Merkulova N. I. et al.* BVRI CCD-Photometry of Comparison Stars in the Neighborhoods of Galaxies with Active Nuclei. II // *Astrophysics*. — 2005. — Vol. 48, № 3. — P. 304—320.
2. *Назаров С. В.* Поиск переменных звезд // *Astrotourist*. URL: <http://astrotourist.info/poisk-peremennykh-zvezd-obshchaya>. — 2019.

О ТЕКУЩЕЙ ВРЕМЕННОЙ АСИММЕТРИИ СОЛНЕЧНЫХ ЦИКЛОВ

А. А. Калинин, Н. Д. Калинина

Уральский федеральный университет

Построена зависимость асимметрии солнечной активности от номера 11-летнего цикла на период 1745—2018 гг. Зависимость показывает, что за последние два цикла произошел резкий спад активности Солнца, возможно, предвещающий глубокий минимум.

ABOUT CURRENT TEMPORAL SOLAR ACTIVITY CYCLE ASYMMETRY

A. A. Kalinin, N. D. Kalinina

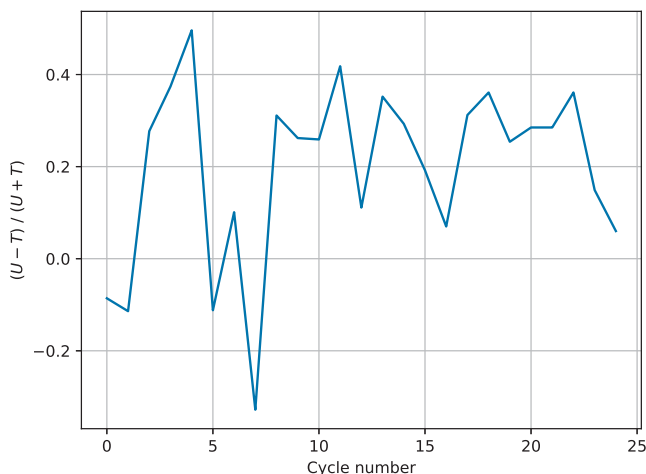
Ural Federal University

We have constructed the dependence of asymmetry of sunspot activity upon the number of 11-year cycle for the 1745—2018 year period. This dependence shows the abrupt sunspot fall during two last cycles of solar activity. Presumably this fall appears to be a precursor of a deep minimum.

Для второй половины XX в. характерен высокий уровень солнечной активности. Но на протяжении 400 лет документированных наблюдений (см. обзоры [1, 2]) существовали длительные глубокие минимумы. Самый значительный из них — Минимум Маундера (1645—1715). В статье [3] Минимум Маундера соответствует отрицательным значениям графика зависимости асимметрии A циклов солнечной активности от номера цикла $A = (U - T) / (U + T)$, где U — длительность фазы спада от максимума до минимума; T — длительность фазы подъема от минимума до максимума для каждого конкретного 11-летнего цикла солнечной активности. На данный момент мы построили подобную зависимость асимметрии солнечных циклов для чисел Вольфа в версии 2.0 [2].

Получено: 1) в отличие от результатов статьи [3] асимметрия для минимума Дальтона принимает отрицательные значения; 2) значение асимметрии, прогнозируемое на 24-й цикл (поскольку цикл еще

не закончился), дает основание полагать, что это значение будет наименьшим со времени минимума Дальтона и асимметрия имеет тенденцию попасть в область отрицательных значений (см. рисунок). Таким образом, текущая солнечная активность близка по параметрам к минимуму Дальтона, а в дальнейшем, возможно, и к минимуму Маундера.



Зависимость характеристик солнечной активности от номера цикла

Работа проведена при финансовой поддержке государства в лице Министерства науки Российской Федерации (базовая часть госзадания, РК № АААА-А17-117030310283-7), а также при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации, постановление № 211, контракт № 02.А03.21.0006.

Библиографические ссылки

1. Обридко В. Н., Наговицын Ю. А. Солнечная активность, цикличность и методы прогноза. — СПб. : ВВМ, 2017.
2. Usoskin I. G. A history of solar activity over millennia // Sol. Phys. — 2017. — Vol. 14. — P. 97.
3. Gleissberg W., Damboldt T. Reflections on the Maunder Minimum of sunspots // Journal of the British Astronomical Association. — 1979. — Vol. 89. — P. 440—449.

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ ВРАЩЕНИЕ ЗВЕЗД СПЕКТРАЛЬНОГО КЛАССА А

Е. С. Калиничева¹, И. С. Саванов¹, Е. С. Дмитриенко²

¹*Институт астрономии РАН, ²МГУ им. М. В. Ломоносова,
Государственный астрономический институт им. Штернберга*

В настоящей работе рассматриваются свойства дифференциального вращения группы звезд спектрального класса А по наблюдениям с космическим телескопом Кеплер.

DIFFERENTIAL ROTATION OF A-TYPE STARS

E. S. Kalinicheva¹, I. S. Savanov¹, E. S. Dmitrienko²

¹*Institute of Astronomy RAS, ²M. V. Lomonosov MSU,
P. K. Shternberg State Astronomical Institute*

We considered differential rotation of stars of spectroscopic type А based on the high-precision Kepler space telescope photometry data.

Фотометрические наблюдения высокой точности, полученные с космическим телескопом Кеплер, открыли возможности исследования переменности звезд, в том числе вызванной их вращательной модуляцией вследствие присутствия пятен на поверхности.

Наблюдательные проявления дифференциального вращения (ДВ) звезд могут быть исследованы, например, из различия периодов, установленных по расщеплению пиков в спектрах мощности блеска запятненных звезд. С использованием этого метода в [1] и [2] были установлены параметры ДВ для представительных выборок с большим числом звезд. Это наиболее многочисленные однородные данные определений параметров α и $\Delta\Omega$ в широком диапазоне эффективных температур (3 200—12 000 К), позволяющие проводить их статистический анализ. По данным [2] можно сделать вывод о росте параметра $\Delta\Omega$ у звезд горячее 6 700 К.

Результаты ряда других исследований не противоречат такому предположению. Метод определения параметра дифференциального вращения, основанный на спектральных наблюдениях и связанный с

анализом Фурье-преобразования профилей линий в спектрах быстро вращающихся звезд, был развит в исследовании [3] и представлен в серии статей (см. в [4]). Результаты этих исследований хорошо согласуются с [2] для объектов с температурами выше 8 000 К. Данные анализа [5] привели к установлению в спектре мощности А—В звезд специфического набора частот. В [6] была сделана попытка интерпретировать происхождение пиков на спектрах мощности наличием групп пятен, расположенных на различных широтах звезды, которая обладает дифференциальным вращением.

Мы рассмотрели данные для объектов с температурой фотосферы более 7 500 К. Таких объектов в списке [2] оказалось 56. Для каждого из них по данным архива Кеплер для сета наблюдений Q3 мы построили спектры мощности и проанализировали фазовые диаграммы, соответствующие доминирующему периоду. Оказалось, что 43 из рассматриваемых звезд можно отнести к пульсирующим. Лишь остальные 13 могут рассматриваться, как объекты с вращательной модуляцией блеска. У многих из них имеются пики для половинного значения величины периода вращения, которые принято объяснять наличием пятен на противоположных частях поверхности. В будущем мы предполагаем провести детальное исследование этих звезд.

Библиографические ссылки

1. *Reinhold T., Reiners A., Basri G.* Rotation and differential rotation of active Kepler stars // *Astronomy and Astrophysics*. — 2013. — Vol. 560.
2. *Reinhold T., Gizon L.* Rotation, differential rotation, and gyrochronology of active Kepler stars // *Astronomy and Astrophysics*. — 2015. — Vol. 583.
3. *Reiners A.* Rotation- and temperature-dependence of stellar latitudinal differential rotation // *Astronomy and Astrophysics*. — 2006. — Vol. 446, iss. 1. — P. 267—277.
4. *Ammler-von-Eif M., Reiners A.* New measurements of rotation and differential rotation in A-F stars: are there two populations of differentially rotating stars? // *Astronomy and Astrophysics*. — 2012. — Vol. 542.
5. *Balona L. A.* Activity in A-type stars // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2013. — Vol. 431, iss. 3. — P. 2240—2252.
6. *Savanov I. S., Dmitrienko E. S.* Brightness Variability of 12 ROTD A-Stars // *Astrophysics*. — 2019. — Vol. 62, iss. 1. — P. 48—56.

ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ ПРОМЕЖУТОЧНОГО ПОЛЯРА HT Cam

В. П. Кожевников

Уральский федеральный университет

Мы провели фотометрические наблюдения промежуточного поляра HT Cam в течение 25 ночей общей продолжительностью 162 ч в марте 2018 — апреле 2019 г. Эти продолжительные наблюдения позволили определить период вращения белого карлика с высокой точностью, $P_{\text{spin}} = 515.05937 \pm 0.00022$ с.

PHOTOMETRIC OBSERVATIONS OF THE INTERMEDIATE POLAR HT Cam

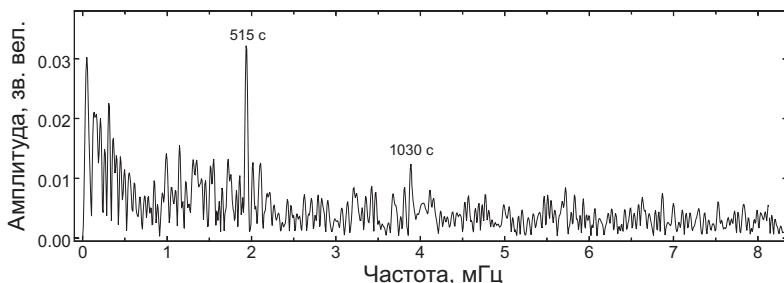
V. P. Kozhevnikov

Ural Federal University

We performed photometric observations of the intermediate polar HT Cam during 25 nights with a total duration of 162 hours in March 2018 — April 2019. These extensive observations allowed us to determine the spin period of the white dwarf with high precision, $P_{\text{spin}} = 515.05937 \pm 0.00022$ s.

Промежуточные поляры принадлежат к подтипу катаклизмических переменных, в которых магнитный белый карлик вращается несинхронно и поэтому производит быстрые когерентные колебания блеска с периодом вращения. Двадцать лет назад был измерен точный период колебаний блеска промежуточного поляра HT Cam, $P_{\text{spin}} = 515.0592 \pm 0.0002$ с [1]. Чтобы узнать, насколько этот период изменился в настоящее время, в марте 2018 — апреле 2019 г. на 70-см телескопе Коуровской обсерватории и многоканальном фотометре мы провели фотометрические наблюдения HT Cam в течение 25 ночей общей продолжительностью 162 ч. HT Cam — это довольно слабая звезда 17^m и глазом не видна. Поэтому для центрирования HT Cam в диафрагме фотометра мы использовали шаговые двигатели, перемещающие телескоп по координатам под управлением компьютера.

В амплитудном спектре (см. рисунок) ясно видны пик, соответствующий периоду вращения белого карлика, а также его первая гармоника. Из этого амплитудного спектра мы нашли период колебания, $P_{\text{spin}} = 515.4 \pm 1.6$ с. Амплитуда колебания равна 0.033^m . Как видим, наблюдения в течение одной ночи могут дать период колебания только с невысокой точностью. Точное значение периода колебания можно получить с помощью спектра мощности общего временного ряда, в котором промежутки, разделяющие отдельные наблюдательные ночи, заполнены нулями в соответствии с временем наблюдений. Из всех наших данных, охватывающих год, мы нашли период колебания, $P_{\text{spin}} = 515.05937 \pm 0.00022$ с. Сравнивая этот период с периодом, найденным в [1], который отличается только на 0.6σ , мы нашли $dP/dt < 10^{-12}$ (уровень доверия 1σ). Таким образом, период вращения белого карлика в НТ Сам является высокостабильным. Возможная скорость изменения периода оказалась на порядок меньше скоростей изменения периодов вращения, найденных в некоторых других промежуточных полярах (10^{-11}).



Амплитудный спектр кривой блеска НТ Сам полученной 11 марта 2018 г. Он позволяет обнаружить строго периодическое колебание с периодом 515 с и амплитудой 0.033^m , а также его первую гармонику

Работа выполнена при финансовой поддержке государства в лице Министерства образования и науки Российской Федерации (базовая часть госзадания, РКАААА-А17-117030310283-7).

Библиографические ссылки

1. *Kemp J., Patterson J., Thorstensen J. R. et al.* Rapid Oscillations in Cataclysmic Variables. XV. HT Camelopardalis (=RX J0757.0+6306) // Publ. Astron. Soc. Pac. — 2002. — Vol. 114. — P. 623–629.

УГЛЕВОДОРОДЫ ТИТАНА И ИХ ЗНАЧЕНИЕ ДЛЯ ТЕОРИИ ОБРАЗОВАНИЯ УГЛЕВОДОРОДНЫХ РЕСУРСОВ ЗЕМЛИ

Л. К. Малышева

Институт геологии и геохимии

Уральского отделения Российской академии наук

Рассмотрена имеющаяся информация о существовании гигантских скоплений углеводородов на Титане, спутнике Сатурна. Эта информация проанализирована в контексте существующих концепций генезиса углеводородных ресурсов Земли. Показано, что наличие углеводородных скоплений на Титане противоречит биогенной теории формирования месторождений углеводородного сырья. Делается вывод, что имеющиеся данные по углеводородам Титана соответствуют представлениям о формировании углеводородных скоплений в результате абиогенного углеводородного синтеза.

HYDROCARBONS OF TITAN AND THEIR SIGNIFICANCE FOR THE THEORY OF THE EARTH HYDROCARBON RESOURCES FORMATION

L. K. Malysheva

Institute of Geology and Geochemistry, Urals Branch of RAS

The available information about the existence of giant hydrocarbon accumulations on Titan (Saturn's moon) is considered. This information is analyzed in the context of the existing concepts of the Genesis of hydrocarbon resources of the Earth. It is shown that the presence of hydrocarbon concentrations on Titan contradicts the biogenic theory of formation of hydrocarbon deposits. It is concluded that the available Data on Titan's hydrocarbons correspond to the ideas about the formation of hydrocarbon concentrations in the result of abiogenic hydrocarbon synthesis.

Нефть известна человечеству с древнейших времен. Более двух веков назад в спектре различных точек зрения на происхождение

нефти стали формироваться два практически антагонистических подхода — «органическая» и «неорганическая» концепции генезиса нефти. К 60-м гг. XX в. сформировалось представление о единстве всех горючих полезных ископаемых и генетической связи нефти с ископаемым органическим веществом осадочных пород. Во второй половине XX в. пик доминирования «органической» концепции был пройден и началось возрождение «неорганического» направления.

В свете существующей дискуссии о генезисе месторождений углеводородного сырья большой интерес представляет информация о существовании гигантских скоплений углеводородов на Титане. По оценкам исследователей [1], общий запас жидкостей Титана превышает земные запасы нефти и газа в несколько сотен раз. В одном только море Лигеи содержится $\sim 10^4$ км³ углеводородной жидкости. Тем не менее это составляет лишь небольшую долю количества паров метана в атмосфере. Значительное количество углеводородов присутствует в твердом состоянии в виде дюнных песков (20 % поверхности Титана), что по углеродному эквиваленту в несколько сотен раз превышает запасы угля на Земле.

Исследователи Титана отмечают, что для поддержания метанового цикла необходимо постоянное его поступление из недр. При этом в рельефе поверхности имеются признаки дегазационных процессов, которые могут подпитывать метановый цикл.

Биогенное формирование углеводородов Титана исключено. Поэтому основным источником углеводородного разнообразия, обнаруженного на его поверхности, по нашему мнению [2], являются первичный углеводородный синтез [3] в литосфере Титана и, в меньшей степени, первичные протопланетные углеводородные соединения, поступающие на поверхность из его ядра.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИГГ УрО РАН № АААА-А19-119072990020-6.

Библиографические ссылки

1. Lorenz R. D., Mitchell K. L., L. Kirk R. et al. Titan's inventory of organic surface materials // *Geophys. Res. Lett.* — 2008. — Vol. 35. — P. L02206.
2. Малышева Л.К. Абиогенные углеводороды Титана // *Ежегодник-2018: тр. ИГГ УрО РАН.* — 2019. — Т. 166. — С. 108—113.
3. Газовый фактор в эндогенных процессах /ред. А. И. Малышев. — Екатеринбург : ИГГ УрО РАН, 2015. — С. 324.

ЯВЛЕНИЕ МИКРОЛИНЗИРОВАНИЯ Gaia16aye

С. В. Назаров

Крымская астрофизическая обсерватория

В этой работе представлены фотометрические и спектральные наблюдения длительностью более 500 суток, полученные с целью построения оптимальной модели микролинзирования. В результате мы получили полный набор параметров двойной системы, вызвавшей это явление.

MICROLENSING EVENT Gaia16aye

S. V. Nazarov

Crimean Astrophysical Observatory

We present the photometric and spectroscopic follow-up covering 500 days of the event evolution and search for a possible microlensing model in order to derive the parameters of the lensing binary system.

Gaia16aye — это явление двойного микролинзирования, одно из первых явлений микролинзирования, обнаруженных космическим телескопом Gaia [1]. Кривая блеска демонстрировала пять эпизодов увеличения блеска (до 11^m), и были очень хорошо прописаны более чем 25 000 точек полученных целой сетью телескопов.

С целью построения оптимальной модели микролинзирования проведены фотометрические и спектральные наблюдения длительностью более 500 суток. В результате мы получили полный набор параметров двойной системы, вызвавшей это явление.

Библиографические ссылки

1. Wyrzykowski L., Mróz P., Rybicki K. A. et al. Full Orbital Solution for the Binary System in the Northern Galactic Disk Microlensing Event Gaia16aye // arXiv e-prints. — 2019. — P. arXiv:1901.07281. 1901.07281.

ГАММА-ТЕЛЕСКОП ГТ-48: ИСТОРИЯ, СОВРЕМЕННОСТЬ И ПЕРСПЕКТИВЫ

С. В. Назаров, А. В. Жовтан, А. В. Лютый, А. В. Козлов

Крымская астрофизическая обсерватория

В этой работе мы представляем описание истории развития гамма-астрономии в КрАО, основные характеристики телескопа ГТ-48, достигнутые результаты, его технические проблемы и возможные пути их решения, а также перспективы развития.

GT-48 GAMMA TELESCOPE: HISTORY, MODERNITY AND PROSPECTS

S. V. Nazarov, A. V. Zhovtan, A. V. Lyuty, A. V. Kozlov

Crimean Astrophysical Observatory

We present a description of the history of development gamma-ray-astronomy in CrAO, main characteristics GT-48, results, technical problems and outlooks.

Происхождение космических лучей, кванты которых обладают колоссальными энергиями, является одним из актуальнейших вопросов на стыке астрофизики и физики. Однако земная атмосфера совершенно непрозрачна для гамма-диапазона, поэтому приходится либо запускать дорогостоящие гамма-телескопы на орбиту, либо пользоваться оставленной природой «лазейкой» — регистрировать гамма-кванты сверхвысоких энергий (СВЭ), наблюдая черенковские вспышки в атмосфере в ночное время при взаимодействии квантов с земной атмосферой [1].

Излучение вспышек идет в оптическом диапазоне под малым углом (1°) к направлению движения первичного гамма-кванта, что позволяет определить примерное направление на источник [2]. Площадь, освещаемая черенковской вспышкой, при этом довольно велика — десятки тысяч квадратных метров. Благодаря этому оказывается возможной регистрация малых потоков гамма-квантов. Основным препятствием для обнаружения и исследования источников

гамма-лучей СВЭ является наличие значительного фона космических лучей, частицы которых вызывают в атмосфере Земли черенковские вспышки, трудноотличимые от вспышек, вызванных гамма-квантами. Тем не менее методика их различения к настоящему времени хорошо разработана, что позволяет вести успешные наблюдения с поверхности Земли.

В России есть всего один гамма-телескоп сверхвысоких энергий — ГТ-48 в КраО. Он относится к инструментам второго поколения и обладает возможностью регистрации излучения как в видимом, так и в ультрафиолетовом диапазонах. Наличие второй секции расширяет потенциал инструмента и скорость его работы. Однако к настоящему моменту инструмент нуждается в капитальном ремонте или серьезной модернизации.

В этой работе мы представляем описание истории развития гамма-астрономии в КраО, основные характеристики телескопа ГТ-48, достигнутые результаты, его технические проблемы и возможные пути их решения, а также перспективы развития [3].

Библиографические ссылки

1. *Neshpor Yu. I., Zhovtan A. V., Zhogolev N. A. et al.* Results of observations of very high energy Cyg X-3 and Cyg γ -2 sources in Crimea // Bulletin of the Russian Academy of Sciences, Physics. — 2009. — Vol. 73, № 5. — P. 655—656.
2. *Strigunov K. S., Zhovtan A. V.* Long-term observations of the blazar 1ES 1426+428 with the GT-48 Cerenkov telescope // Astronomy Reports. — 2015. — Vol. 59, № 3. — P. 175—182.
3. *Strigunov K. S., Zhovtan A. V., Neshpor Yu. I., Borman G. A.* Long-Term Observations of the Blazar Mrk 501 with the GT-48 Cherenkov Telescope // Astronomy Letters. — 2019. — Vol. 45, № 1. — P. 1—9.

ОБЗОР РЕЗУЛЬТАТОВ АСТРОМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ СПУТНИКОВ УРАНА И НЕПТУНА НА ТЕЛЕСКОПАХ ГАО РАН И КРАО РАН

С. В. Назаров¹, Д. А. Бикулова², М. Ю. Ховричев³,
А. Н. Рублевский¹

¹Крымская астрофизическая обсерватория, ²Пулковская
обсерватория, ³Санкт-Петербургский государственный
университет

Представлены наблюдения спутников Урана и Нептуна с помощью
телескопов ГАО и КРАО РАН.

REVIEW OF THE RESULTS OF ASTROMETRIC OBSERVATIONS OF THE URANIAN AND NEPTUNIAN SATELLITES WITH THE PULKOVO AND CRIMEAN OBSERVATORIES TELESCOPES

S. V. Nazarov¹, D. A. Bikulova², M. Yu. Khovritchev³,
A. N. Rublevsky¹

¹Crimean Astrophysical Observatory, ²Pulkovo Observatory, ³Saint
Petersburg State University

We present observations of the satellites of Uranus and Neptune carried
out using telescopes of the Pulkovo and Crimean observatories.

В 2019 г. проведены наблюдения спутников Урана и Нептуна с по-
мощью телескопов ГАО и КРАО РАН. Астрометрическая редукция
полученных снимков обеспечила привязку финальных положений к
системе Gaia DR2. Точность одного наблюдения обычно лучше 50
mas. Нормальные места характеризуются сходимостью порядка 10
mas. В целом имеет место хорошее согласие результатов наблюдений
с комбинациями EPM2017 и соответствующих свежих теорий движе-
ния спутников. Остаточные вариации О–С явно содержат информа-
цию о динамических явлениях в исследованных системах спутников
планет.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках
научного проекта 19-32-90175.

**СПЕКТРАЛЬНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ
ПОСЛЕВСПЫШЕЧНЫХ ПЕТЕЛЬ
В АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ NOAA 11515**

**Т. П. Никифорова, А. И. Шагабутдинов, С. Ю. Парфёнов,
А. В. Кожевникова**

*Астрономическая обсерватория
Уральского федерального университета*

Мы представляем результаты наблюдений и анализа спектров петельной системы в активной области NOAA 11515, наблюдавшейся на лимбе Солнца 09-07-12 после вспышки балла C6.5. Исследована структура высвечивания плазмы в линии К CaII в подножиях петель на разных расстояниях от лимба Солнца. Создана компьютерная программа, выделяющая компоненты спектральных линий. Выявлены нетепловые компоненты (излучение пучков ускоренных ионов CaII из нижних частей петель), получены их параметры.

**SPECTRAL OBSERVATIONS OF AFTER-FLARE LOOPS
IN THE ACTIVE AREA NOAA 11515**

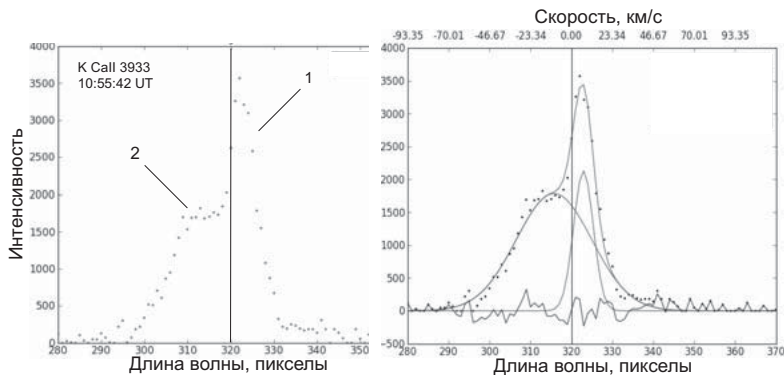
**T. P. Nikiforova, A. I. Shagabutdinov, S. Yu. Parfenov,
A. V. Kozhevnikova**

Astronomical observatory of Ural Federal University

We present the results of observations and analysis of the spectra of the loop system in the active region NOAA 11515 observed on the limb of the Sun 09-07-12 after the flare C6.5. The structure of plasma emission in the K CaII line at the foot of loops at different distances from the limb of the Sun was studied. A computer program was created, numerical simulation was carried out. Non-thermal components (emission of beams of accelerated CaII ions from the lower parts of the loops) were revealed, and their parameters were obtained.

Из анализа космических наблюдений Солнца в жестком рентгеновском излучении и из наземных радионаблюдений к настоящему времени стало известно, что значительная часть энергии, выделяющейся в течение вспышек, обусловлена нетепловыми процессами,

связанными с ускоренными электронами. Механизм ускорения электронов до сих пор неизвестен [1]. В видимом диапазоне спектра таких наблюдений мало. В данной работе представлены спектральные наблюдения петель вспыхивающе-активной области 11515, полученные в АО УрФУ с помощью телескопа АЦУ-5, спектрографа АСП- 20 и ПЗС-системы SXV-H9 Starlight Xpress. Исследована структура эмиссии в линии К CaII 3933 Å ионизованного кальция в подножиях петель. С помощью программы PPSLSC (автор С. Ю. Парфенов) выявлены компоненты тонкой структуры излучения в петлевой системе и получены их параметры: скорости по лучу зрения, доплеровские полуширины, центральные интенсивности и энергия, излученная каждым компонентом. В шести исследованных петлях обнаружено нетепловое излучение потока ускоренных ионов кальция CaII из боковых частей петель (см. рисунок), определена ширина каналов и энергия, излученная нетепловыми компонентами. Полученные результаты сопоставлены с космическими наблюдениями Солнца.



Профиль спектральной линии К CaII в послевспыхивающей петле и его разложение на два компонента: 1 — излучение петли (тепловой компонент); 2 — излучение ускоренных частиц (нетепловой компонент)

Работа выполнена при финансовой поддержке государства в лице Министерства образования и науки Российской Федерации (базовая часть госзадания, РКАААА-A17-117030310283-7).

Библиографические ссылки

1. *Altynsev A. T., Meshalkina N. S., Lysenko A. L., Fleishman G. D.* Rapid Variability in the SOL2011-08-04 Flare: Implications for Electron Acceleration // *Astrophys. J.* — 2019. — Vol. 883. — P. 1—13.

О ГРАДИЕНТЕ МЕТАЛЛИЧНОСТИ В ГАЛАКТИКЕ

М. Э. Попова, А. В. Локтин

Уральский федеральный университет

По данным о рассеянных звездных скоплениях исследован вопрос о градиенте металличности в диске Галактики. Получено скачкообразное изменение средней металличности скоплений с ростом галактоцентрического расстояния. Не выявлено значимой зависимости средней металличности от возраста скоплений.

ON THE METALLICITY GRADIENT IN THE GALAXY

M. E. Popova, A. V. Loktin

Ural Federal University

Based on open clusters data, the problem of the metallicity gradient in the galactic disk was studied. A saltatory variation in the average metallicity of clusters with galactocentric distance was obtained. No significant dependence of the average metallicity on the age of the clusters was revealed.

Высокоточные данные Gaia DR2 существенно повлияли на исследования в разных областях галактической астрономии. Мы исследовали пространственный и временной градиенты металличности в диске Галактики по данным о 322 рассеянных скоплениях (РЗС).

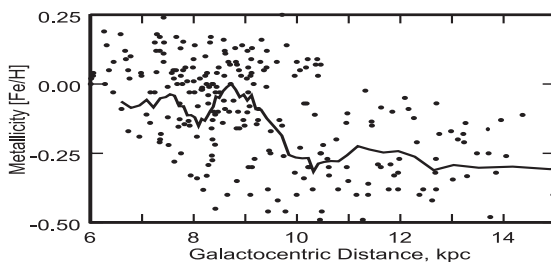


Рис. 1. Сглаженная зависимость металличностей РЗС от R

На рис. 1 представлена сглаженная зависимость металличности $[Fe/H]$ скоплений выборки от галактоцентрического расстояния R .

Хорошо заметен скачок средней металличности РЗС в области $R = 9$ —10 кпк. Для скоплений из внутренней и внешней по отношению к скачку областей Галактики наклоны регрессионных прямых линейных зависимостей $[\text{Fe}/\text{H}]$ от R оказались незначимыми. Таким образом, зависимость металличности от R представляется в виде двух отрезков горизонтальных прямых, разнесенных по $[\text{Fe}/\text{H}]$ на величину 0.22 при средних значениях металличности -0.06 ± 0.02 для $R < 9$ кпк и -0.28 ± 0.03 для $R > 10$ кпк.

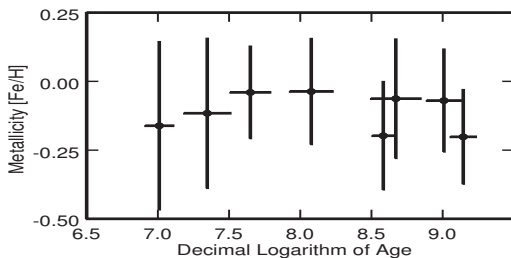


Рис. 2. Зависимость средней $[\text{Fe}/\text{H}]$ от среднего логарифма возраста РЗС

Для исследования зависимости средней металличности РЗС от возраста скопления выборки были разделены на группы по принадлежности к спиральным рукавам и поколениям [1]. На рис. 2 показаны средние логарифмы возраста и металличности для поколений каждой спиральной ветви. Незаметно возрастного тренда средних металличностей РЗС, так что современные данные не дают возможности говорить не только о темпе обогащения диска Галактики тяжелыми элементами, но даже и о заметности самого обогащения.

Работа проведена при финансовой поддержке государства в лице Министерства науки Российской Федерации (базовая часть госзадания, РК № АААА-А17-117030310283-7), а также при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации, постановление № 211, контракт № 02.А03.21.0006.

Библиографические ссылки

1. *Popova M. E., Loktin A. V.* Open star clusters in the spiral arms of our Galaxy // *Astronomy Letters*. — 2008. — Vol. 34. — P. 551—557.

СОЗДАНИЕ ПОСТОЯННО ДЕЙСТВУЮЩЕЙ РЕФЕРЕНЦНОЙ СТАНЦИИ ГНСС В ГОРОДЕ АЛАПАЕВСКЕ

Д. В. Рычков¹, А. Д. Башарин², Т. И. Левитская²

¹ООО «УГТ-Холдинг», ²Уральский федеральный университет

Приведены этапы создания, представлены порядок и методика работ по установке и определению координат постоянно действующей базовой станции ГНСС в г. Алапаевске. Составлены отчеты по постобработке и уравниванию координат базовой станции относительно пунктов ГГС при помощи специализированного программного обеспечения «Topcon Tools». Выполнено уравнивание базовой станции от опорной геодезической сети, даются оценка точности координат, привязка к ней базовой станции. Сделаны выводы о работоспособности базовой станции.

CREATION OF A PERMANENTLY OPERATING GNSS REFERENCE STATION IN THE CITY OF ALAPAEVSK

D. V. Rychkov¹, A. D. Basharin², T. I. Levitskaya²

¹“UGT-Holding”, ²Ural Federal University

The stages of creation are given, the procedure and methodology for the installation and determination of the coordinates of the permanent GNSS base station in the city of Alapaevsk are presented. Reports were prepared on post-processing and equalization of the coordinates of the base station relative to the GGS points using the specialized software “Topcon Tools”, the coordinates of the base station. Equalization of the base station from the reference geodetic network is carried out, the accuracy of coordinates is estimated, and the base station is linked to it. Conclusions are made about the health of the base station.

Данные геодезических работ, полученные с использованием системы точного позиционирования, позволяют определять пространственное местоположение характерных точек объектов на обширной площади. Система основана на сети постоянно действующих дифференциальных базовых станций (БС), которые устанавливаются на

пунктах с известными пространственными координатами, принимают и обрабатывают сигналы глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Станции объединяют каналами связи с единым центром для определения координат точек с одинаковой точностью и в единой системе отсчета (времени и координат). Системы точного позиционирования в России в настоящее время находятся пока в стадии активного развития. В 2019 г. была создана постоянно действующая базовая станция в г. Алапаевске, расположенном в Свердловской области на р. Нейва в 146 км от г. Екатеринбурга. В качестве базовой станции использовался приемник Javad Maxог GGDТ, позволяющий принимать сигналы глобальных навигационных спутниковых систем GPS и ГЛОНАСС. При выборе БС учитывалась область радиусом 55—60 км, в которой возможно определение пространственного местоположения точек объекта дифференциальными методами с гарантированной сантиметровой точностью. При этом точность определения координат подвижной станции напрямую зависит от ее удаления от БС. Поэтому оптимальным положением базовой станции был выбран геометрический центр района предполагаемых геодезических работ по определению координат объектов.

Антенна спутникового приемника должна быть установлена таким образом, чтобы имелась возможность отслеживать спутники, находящиеся под углом более 10° над горизонтом (угол отсечки). Монтаж базовой станции был выполнен на крыше жилого дома. Для планово-высотной привязки БС были выбраны пункты государственной геодезической сети (ГГС), получены координаты пунктов из Росреестра и выполнен их поиск на местности. Привязка БС к пунктам ГГС проводилась в едином сеансе связи. Это означает, что приемник на БС и приемник на пункте ГГС должны одновременно производить измерения с условием наблюдения одного и того же созвездия спутников. Для измерений на пунктах ГГС использовались приемники Javad Triumph-1 и Javad Triumph-2. Непосредственно перед измерениями производилось центрирование, горизонтирование и определялась высота приемника над маркой. Камеральная обработка результатов измерений проводилась по программе «Topcon Tools» и состояла из трех частей: импорт и предобработка данных; математическая обработка и вычисление ошибок; уравнивание полученных ошибок. Результатом уравнивания данных измерений являются координаты базовой станции, вычисленные с точностью по оси $x \pm 0.033$ м, по оси $y \pm 0.028$ м, по высоте ± 0.035 м.

Список участников конференции



ФИО	Организация	E-mail
Александрова Анна Геннадьевна	ТГУ	aleksann@sibmail.com
Алексанцева Дарья Владимировна	СевГУ	elcom131@mail.ru
Алексеев Илья Юрьевич	КраО РАН	ilya-alekseev@mail.ru
Ахметова Оксана Валентиновна	БашГУ	ahoksana@yandex.ru
Бакалова Дарья	ГАИШ МГУ	bakalova.d18@physics.msu.ru
Балакина Елена Алексеевна	МГУ	elena@balakin.ru
Балуев Роман Владимирович	СПбГУ	r.baluev@spbu.ru
Балута Анастасия Юрьевна	ГАИШ МГУ	nast0307@mail.ru
Баляев Иван Алексеевич	СПбГУ	balasteravan@yandex.ru
Бахур Дмитрий Анатольевич	ИНАСАН	bahur.master@gmail.com
Башарин Алексей Дмитриевич	УрФУ	frait95@gmail.com
Бикулова Динара Александровна	ГАО РАН	ras1304@yandex.ru
Бисрина Анастасия Павловна	АО УрФУ	bisyarina_nastya@mail.ru
Блинкова Евгения Владимировна	ТГУ	zbizk322@mail.ru
Блинников Сергей Иванович	ГАИШ МГУ	sblinnikov@gmail.com
Боли Пол	МФТИ	pboley@gmail.com
Бордовицына Татьяна Валентиновна	ТГУ	tvbord@sibmail.com
Быстров Дмитрий Сергеевич	БашГУ	bystrovdima1998@yandex.ru
Васильев Константин Игоревич	МГУ	kvasiliev95@mail.ru
Васильева Мария Алексеевна	УрФУ	maxa1907@icloud.com
Ватолин Янис Юрьевич	УрФУ	yavatolin@mail.ru
Вахитов Ринат Фаритович	ЧелГУ	R_T_X@mail.ru

ФИО	Организация	E-mail
Верецагин Сергей Викторович	ИНАСАН	svvs@ya.ru
Веселова Ангелина Владимировна	СПбГУ	linav93@yandex.ru
Вибе Дмитрий Зигфридович	ИНАСАН	dwiebe@inasan.ru
Волков Константин Валерьевич	СКБ-Контур	kvvolkov19@gmail.com
Волкова Екатерина Евгеньевна	УрФУ	7963036975vee@mail.ru
Волошин Владимир Николаевич	УрФУ	foxastrophys@gmail.com
Галиев Михаил Сергеевич	УрФУ	michas99@mail.ru
Галушина Татьяна Юрьевна	ТГУ	volna@sibmail.com
Гарипова Гузель Минизиевна	БГПУ	guzel_ufa87@mail.ru
Герасимов Иван Сергеевич	ГАИШ МГУ	ivangerasimov2@mail.ru
Гималиева Алина Дамировна	УрФУ	alina.gimalieva@mail.ru
Гиниятов Дамир Альбертович	УрФУ	idamir2000@gmail.com
Горда Станислав Юрьевич	АО УрФУ	stanislav.gorda@urfu.ru
Гусев Владислав Денисович	УрФУ	Vlad06gusev@gmail.com
Дедов Евгений Олегович	УрФУ	dedov.ev98@gmail.com
Демидов Андрей Павлович	ФГБУ ЦАО	the-admax@yandex.ru
Дмитриенко Надежда Сергеевна	МФТИ	dmitrienko.ns@phystech.edu
Добролюбова Виолетта Александровна	СевГУ	dva-0601@mail.ru
Дремов Владимир Владимирович	РФЯЦ-ВНИИТФ	V.V.Dryomov@vniitf.ru
Дремова Галина Николаевна	РФЯЦ-ВНИИТФ	G.N.Dryomova@mail.ru
Дроздов Сергей Александрович	АКЦ ФИАН	sai.drodzov@gmail.com
Дрягина Анастасия Евгеньевна	АО УрФУ	dryagina.nastya@list.ru

ФИО	Организация	E-mail
Дудоров Александр Егорович	ЧелГУ	dudorov@csu.ru
Егоров Олег Владимирович	ГАИШ МГУ	egorov@sai.msu.ru
Ермаков Алексей Викторович	УрФУ	alexey_erm4@mail.ru
Ефремова Екатерина Викторовна	ИНАСАН	ekvefremova@gmail.com
Железнов Николай Борисович	ИПА РАН	znb@iaaraas.ru
Жмайлов Борис Борисович	ЮФУ	bbj2001@mail.ru
Жуклевич Глеб Сергеевич	УрФУ	zkl271828@gmail.com
Загоруйко Иван Сергеевич	ТГУ	ivan.zagoruyko.96@mail.ru
Зайкова Анжелика Сергеевна	УрФУ	alexmars4815@gmail.com
Зинченко Игорь Иванович	ИПФ РАН	zin@appl.sci-nnov.ru
Золотарев Роман Викторович	ЮФУ	rv_zolotarev@mail.ru
Казанцев Максим Борисович	«МАОУ Лицей № 6»	kazantzev.maxim2018@yandex.ru
Калинин Александр Александрович	АО УрФУ	alexander.kalinin@urfu.ru
Калинина Наталия Дмитриевна	АО УрФУ	natalia.kalinina@urfu.ru
Калиничева Евгения Сергеевна	ИНАСАН	Good2jane@gmail.com
Каргальцева Наталья Сергеевна	АО УрФУ	kargaltsevans@mail.ru
Кирсанова Мария Сергеевна	ИНАСАН	kirsanova@inasan.ru
Кожевников Валерий Петрович	УрФУ	valery.kozhevnikov@urfu.ru
Кожевникова Алла Валерьевна	АО УрФУ	alla.kozhevnikova@urfu.ru
Козлова Дарья Вадимовна	УрФУ	kozlovadaria@list.ru
Кольмагина Евгения Андреевна	ИНАСАН	narqelion@inbox.ru
Коновалов Антон Вадимович	УрФУ	herr.paulus@inbox.ru

ФИО	Организация	E-mail
Кононов Дмитрий Алексеевич	ИНАСАН	dkononov@inasan.ru
Корень Екатерина Сергеевна	УрФУ	modaeru@gmail.com
Королевская Софья Эдуардовна	УрФУ	korolevsofa@gmail.com
Коротаева Марина Георгиевна	УрФУ	korotaevamg@mail.ru
Корчагин Владимир Иванович	ЮФУ	vkorchagin@sfedu.ru
Крамаренко Иван Геннадьевич	МФТИ	im.kramarenko@gmail.com
Криницкий Евгений Олегович	УрФУ	krinitskiy.96@mail.ru
Кругликов Николай Александрович	АО УрФУ	nick@imp.uran.ru
Крюкова Екатерина Андреевна	СибГУ им. М. Ф. Решетнева	kate-13-kr@yandex.ru
Кузин Алексей Вячеславович	МГУ	alv.kuzin@gmail.com
Кузнецов Эдуард Дмитриевич	УрФУ	eduard.kuznetsov@urfu.ru
Кулеш Максим Вячеславович	УрФУ	mv.kulesh@yandex.ru
Курманов Ергали Бержигитович	КазНУ им. аль-Фараби	ergaly_90@mail.ru
Левитская Татьяна Иосифовна	УрФУ	t.i.levitskaya@urfu.ru
Летнер Оксана Никитична	ТГУ	oksana.letner@gmail.com
Лисицин Данил Денисович	МГУ	liscitin.dd18@physics.msu.ru
Лобачева Антонина Алексеевна	УрФУ	antonina.lobacheva391@gmail.com
Локтин Александр Васильевич	АО УрФУ	alexander.loktin@urfu.ru
Максимова Ломара Аслановна	ИНАСАН	lomara.maksimova@gmail.com
Малютин Иван Александрович	УрФУ	Smoke074@yandex.ru
Маркозов Иван Дмитриевич	СПбГУ	markozoviv@mail.ru
Матвеева Милана Сергеевна	УрФУ	milana.matveeva.2001@mail.ru

ФИО	Организация	E-mail
Медведев Михаил Геннадьевич	УрФУ	grammar.mihannik@gmail.com
Мельников Станислав Юрьевич	НУУ	smeln2005@gmail.com
Микрюков Денис Викторович	СПбГУ	denastron@yandex.ru
Мирзоев Анар Ровшанович	УрФУ	mirzoev11011@mail.ru
Можегоров Алексей Анатольевич	УрФУ	mozhegorov@yandex.ru
Молярова Тамара Сергеевна	ИНАСАН	molyarova@inasan.ru
Москвитин Александр Сергеевич	САО РАН	moskvitin.alexander@gmail.com
Назаров Сергей Валентинович	КраО	astrotourist@gmail.com
Найденова Анастасия Сергеевна	УрФУ	Stasja11@gmail.com
Немтинова Александра Вячеславовна	УрФУ	aleksandra.nemtinova14@mail.ru
Неретина Мария Дмитриевна	ГАИШ МГУ	maneretina@gmail.com
Нигматуллина Гульназ Рамазановна	БашГУ	g.r.nigmatullina@strbsu.ru
Нигматуллина Гульшат Рамазановна	СФ БашГУ	gulchat1511@mail.ru
Никифорова Виктория Вячеславовна	УрФУ	nikiforova.victory@gmail.com
Никифорова Татьяна Петровна	АО УрФУ	tatyana.nikiforova@urfu.ru
Никонов Алексей Сергеевич	АКЦ ФИАН	nikonalesheo@gmail.com
Новинская Александра Константиновна	МГУ	alexandranovinskaya@gmail.com
Нохрина Елена Евгеньевна	МФТИ	nokhrinaelena@gmail.com
Островский Андрей Борисович	УрФУ	Andrey.Ostrovsky@urfu.ru
Павлюченков Ярослав Николаевич	ИНАСАН	pavyar@inasan.ru
Пантслеева Ярослава Игоревна	ТГУ	panteleeva_yaroslava_98@mail.ru
Парфёнов Сергей Юрьевич	АО УрФУ	sergey.parfenov@urfu.ru

ФИО	Организация	E-mail
Перминов Александр Сергеевич	УрФУ	perminov12@yandex.ru
Петрашкевич Игорь Вячеславович	УрФУ	petra444555@gmail.com
Петровская Юлия Станиславовна	УрФУ	dc.dc.20@mail.ru
Подюкова Анастасия Андреевна	УрФУ	nastya.podyukova@mail.ru
Полушина Татьяна Сергеевна	АО УрФУ	tatyana.polushina@urfu.ru
Пона Николета	USA	nicoleta.pauna@clermont.in2p3.fr
Попандопуло Никита Андреевич	ТГУ	nikas.popandopulos@gmail.ru
Попова Мария Эриковна	АО УрФУ	maria.popova@urfu.ru
Постникова Екатерина Сергеевна	ИНАСАН	es_p@list.ru
Потапов Александр Анатольевич	СФ БашГУ	a.a.potapov@strbsu.ru
Потоскуев Александр Эдуардович	УрФУ	aleksander.potoskuev@gmail.com
Прокопьева Екатерина Ивановна	ЧелГУ	katpr1764@mail.ru
Пружинская Мария Викторовна	ГАИШ МГУ	pruzhinskaya@gmail.com
Пуланова Анна Федоровна	УрФУ	anna.pulanova@urfu.ru
Родионов Евгений Игоревич	СПбГУ	rodiонов.evgeniy96@mail.ru
Романовская Анна Михайловна	ИНАСАН	annarom@inasan.ru
Росне Филипп	USA	philippe.rosnet@clermont.in2p3.fr
Рублевский Алексей Николаевич	КраО	anr@craocrimea.ru
Рычков Данил Вячеславович	«ООО УГТ-Холдинг»	danil.rychkov@list.ru
Рябухина Ольга Леонидовна	ИНАСАН	ryabukhina@inasan.ru
Саванов Игорь Спартакович	ИНАСАН	igs231@mail.ru
Салий Светлана Викторовна	АО УрФУ	svetlana.salii@urfu.ru

ФИО	Организация	E-mail
Салмина Полина Васильевна	УрФУ	miss.salmi-na-polina@yandex.ru
Самбаров Георгий Евгеньевич	ТГУ	detovelli@vtomske.ru
Самигуллин Эдуард Робертович	УрФУ	edvard.samigullin@gmail.com
Самирханова Александра Евгеньевна	УрФУ	samirhanova.aleksandra07@gmail.com
Сафронова Виктория Сергеевна	УрФУ	vika483@bk.ru
Селезнев Антон Федорович	УрФУ	anton.seleznev@urfu.ru
Семерова Полина Васильевна	УрФУ	p.v.semerova@urfu.ru
Сизова Мария Дмитриевна	ИНАСАН	sizova@inasan.ru
Сильченко Ольга Касьяновна	МГУ	olga@sai.msu.su
Скрипниченко Павел Вадимович	УрФУ	savl.silverheart@gmail.com
Смирнова Ксения Ильдаровна	УрФУ	ksenia.smirnova@urfu.ru
Соболев Андрей Михайлович	АО УрФУ	andrej.sobolev@urfu.ru
Соков Евгений Николаевич	ГАО РАН	jenias06@gmail.com
Сокова Ираида Александровна	ГАО РАН	Iraida.Anna@gmail.com
Соколова Валерия Алексеевна	УрФУ	valeria.sokolova@urfu.ru
Соловьев Александр Анатольевич	ГАО РАН	solov@gaoaran.ru
Сыпкова Анастасия Михайловна	СПбГУ	sypkova.anastasia@yandex.ru
Сюсина Ольга Михайловна	ТГУ	kleo77@sibmail.com
Терешин Даниил Дмитриевич	УрФУ	tereshin.dd@gmail.com
Тихоненко Илья Сергеевич	СПбГУ	iliya.t@mail.ru
Томилова Ирина Владимировна	ТГУ	irisha_tom@mail.ru
Топчиева Анастасия Павловна	ИНАСАН	ATopchieva@inasan.ru

ФИО	Организация	E-mail
Трофимов Павел Михайлович	ЧелГУ	trofimovpm@gmail.com
Турыгин Степан Сергеевич	СПбГУ	rubens01@mail.ru
Тутуков Александр Васильевич	ИНАСАН	atutukov@inasan.ru
Угольников Олег Станиславович	ИКИ РАН	ougolnikov@gmail.com
Ускова Алиса Вячеславовна	МПГУ	alisauskova@yandex.ru
Фарафонтнова Анастасия Александровна	УрФУ	4045673579@mail.ru
Фернандез Ваденсия Алваро	УрФУ	alvarofervall407@gmail.com
Фролова Валерия Александровна	МФТИ	frolova.va@phystech.edu
Хабиров Руслан Эльгизович	БашГУ	habiboff.ruslan2017@yandex.ru
Хайбрахманов Сергей Александрович	УрФУ	khaibrakhmanov@csu.ru
Харченко Алексей Владимирович	«АО ЦНТЭЭ»	harchenko@cntee.com
Ховричев Максим Юрьевич	СПбГУ	gmymax@gmail.com
Холщевников Константин Владиславович	СПбГУ	kvk@astro.spbu.ru
Чазов Никита Андреевич	УрФУ	nikita.google@gmail.com
Чупина Наталия Викторовна	ИНАСАН	chupina@inasan.ru
Шагабутдинов Альфат Исмагилович	АО УрФУ	alfat.shagabutdinov@urfu.ru
Шагабутдинов Андрей Альфатович	АО УрФУ	andreyshagabutdinov@urfu.ru
Шайдулин Вахит Шамильевич	СПбГУ	shvak@yandex.ru
Шарапов Константин Владиславович	СКБ Контур	shkval1993@ya.ru
Шевелев Антон Павлович	УрФУ	lmlypP@gmail.com
Шематович Валерий Иванович	ИНАСАН	Good2jane@gmail.com
Шолухова Ольга Николаевна	САО РАН	olgasao@mail.ru

ФИО	Организация	E-mail
Шустов Борис Михайлович	ИНАСАН	bshustov@mail.ru
Юдин Владислав Дмитриевич	УрФУ	AbiturientChel74@gmail.com
Ярцова Анастасия Дмитриевна	МГУ	yaan.ph@gmail.com

Содержание

Обзорные лекции	5
Галушина Т. Ю. Орбитальные и вековые резонансы в движении астероидов, сближающихся с Землей	6
Зинченко И. И. Образование массивных звезд	19
Сильченко О. К. Звездообразование в галактиках: космологический контекст	25
Угольников О. С. Средняя и верхняя атмосфера: проблемы, тренды, частицы	40
Холшевников К. В. Семейство метрик в пространствах кеплеровых орбит	61
Шустов Б. М. Об универсальном базовом распределении, описывающем начальную функцию масс различных астрономических объектов	72
Студенческие доклады	74
Балакина Е. А., Пружинская М. В., Москвитин А. С., Блинников С. И. Фотометрия и моделирование сверхновой звезды Ib типа SN 2017grn	75
Васильев К. И., Ярлова А. Д., Егоров О. В. Спектральная диагностика областей звездообразования галактики DDO 53	77
Дмитриенко Н. С., Боли П. Э., Мельников С. Ю. Исследование молодого звездного объекта Th 28	79
Жуклевич Г. С. Применение методов вычислительной гидродинамики для оптимизации ракетных сопел	82
Загоруйко И. С. Исследование эффективности методов численного интегрирования для бортовой модели движения космического аппарата системы ГЛОНАСС	83
Козлова Д. В., Моисеев А. В. Исследование новых протяженных конусов ионизации в галактиках	85
Колымагина Е. А. Влияние корональных выбросов массы на магнитосферы горячих юпитеров	87
Крамаренко И. Г. Где рождается гамма-излучение в активных галактиках?	89
Кузин А. В., Лисицин Д. Д. Динамика пылинок в областях ионизованного водорода	91
Маркозов И. Д. Исследование статистических свойств комптоновского рассеяния в замагниченной релятивистской плазме	93
Никифорова В. В., Кулеш М. В., Селезнев А. Ф. Структура и кинематика широких окрестностей рассеянного скопления Альфа Персея	95

Новинская А. К., Пружинская М. В., Росне Ф., Пона Н. Влияние морфологии родительских галактик на свойства сверхновых типа IA	97
Пантелеева Я. И. Эффект Лидова–Козаи и конфигурационная устойчивость почти кругового движения в ограниченной за- даче трех тел	99
Петрашкевич И. В., Пуанова А. Ф. Фракционирование дейтерия в дозвездных ядрах в области звездообразования ρ Змееносца	101
Попандопуло Н. А. Модифицированная методика выявления и исследования вековых резонансов в динамике околопла- нетных объектов	103
Попандопуло Н. А., Александрова А. Г., Бордовицына Т. В., Томилова И. В. Численные модели движения ис- кусственных спутников Земли и Луны. Последние версии .	105
Прокопьева Е. И. Седиментация пылевых частиц и малых тел в протосолнечной туманности	107
Сыпкова А. М. Поиск и исследование кандидатов в планетар- ные туманности в карликовой галактике NGC 3077	109
Тихоненко И. С. Орбитальный состав внутренних баров в дис- ковых галактиках	111
Турыгин С. С. Оценка темпа потери вещества солнцем за счет солнечного ветра	113
Фролова В. А., Нохрина Е. Е. Распределение интенсивности синхротронного излучения от неоднородного цилиндриче- ского струйного выброса: уярчение к краю	115
Шевелев А. П., Салий С. В. Оптимизация метода поиска наи- лучшего приближения наблюдаемого молекулярного спек- тра	117
Ярлова А. Д., Егоров О. В. Моделирование эмиссионно- го спектра туманности вокруг звезды WNL в галактике NGC 4068	119
Быстров Д. С., Ахметова О. В. Метапредметный подход в изучении астрономии	121
Герасимов И. С., Егоров О. В. Изучение областей звездооб- разования в галактике Sextans A	123
Нигматуллина Г. Р., Гарипова Г. М., Потапов А. А. Ста- бильность круговых орбит фотонов в галактических гало .	125
Ускова А. В. Зависимость эффективности синтеза метанола от параметров химической модели	127
Хабибов Р. Э., Ахметова О. В. Проблемы изучения астроно- мии в школе	129
Ватолин Я. Ю., Горда С. Ю. Редукция фотометрической системы телескопа AstroSib-500RC	131

Волков К. В., Смирнова К. И., Парфёнов С. Ю. Фотометрическое исследование галактик с водяными мазерами и без в различных спектральных диапазонах	133
Гусев В. Д., Кузнецов Э. Д. Исследование динамической эволюции пар транснептуновых объектов	135
Дедов Е. О. Определение возрастов рассеянных звездных скоплений по данным GAIA DR2	137
Малютин И. А., Кузнецов Э. Д. Динамическая и тепловая эволюция астероидов, сближающихся с землей, на орбитах с большими эксцентриситетами	139
Найдёнова А. С. Исследование зависимости появления аномально ярких мезосферных облачных образований от масштабных космических явлений	141

Научные сообщения 143

Балуев Р. В., Соков Е. Н., Сокова И. А., Шайдулин В. Ш. и команда EXPANSION WASP-12 b и WASP-4 b: планеты, сваливающиеся на свою звезду?	144
Балуев Р. В., Микрюков Д. В. Быстрый алгоритм вычисления параметра MOID с контролем ошибок	146
Балуев Р. В., Родионов Е. И., Шайдулин В. Ш., Веселова А. В. Вейвлет-анализ 2D-распределений астероидов Главного пояса и звездного населения Галактики	147
Баляев И. А. Ускорение численного интегрирования уравнений движения астероидов и первые результаты	149
Бисярина А. П., Соболев А. М., Stecklum В. ИК-переменность в области истечений протозвезды IRAS 20126+4104	151
Блинкова Е. В., Томилова И. В. Орбитальная эволюция объектов, движущихся в окрестности резонанса 1 : 4 с вращением Земли	153
Вахитов Р. Ф., Дудоров А. Е., Хайбрахманов С. А. МГД-модель аккреционных дисков молодых звезд	155
Горда С. Ю., Полушина Т. С. Массивная затменная переменная UU CAS — в свете новых данных	157
Дремова Г. Н., Дремов В. В., Тутуков А. В. Межзвездные планеты и кометы: механизмы образования, способы обнаружения, статистика	159
Ефремова Е. В. Обработка наблюдений кометы 21P Джакобини—Циннера, полученных на Звенигородской обсерватории ИНАСАН	161
Золотарев Р. В., Жмайлов Б. Б., Корчагин В. И. Моделирование бесстолкновительного диска NGC 1566 с использованием графических процессоров	163

Калиничева Е. С., Шематович В. И., Павлюченков Я. Н. Убегание атмосфер горячих нептунов	165
Каргальцева Н. С., Дудоров А. Е., Хайбрахманов С. А. Численное моделирование образования первичных прото- звездных дисков	167
Кирсанова М. С., Пунанова А. Ф. Излучение в линиях мо- лекул вблизи области III S235	169
Кононов Д. А., Горда С. Ю., Парфенов С. Ю. О структуре течения в массивной взаимодействующей двойной системе UU Cas	170
Кругликов Н. А., Крушинский В. В., Гроховский В. И., Лямова Г. В., Попов А. А., Назаров С. В. Гиперспек- тральное картирование протопланетного вещества	172
Крюкова Е. А., Назаров С. В. Поиск третьего тела в системах двойных звезд методом тайминга на примере FL Ygr	174
Летнер О. Н., Галушина Т. Ю. Оценка влияния эффекта Яр- ковского на динамику астероидов с малыми перигелийными расстояниями	176
Максимова Л. А., Павлюченков Я. Н. Эпизодическая ак- креция в протопланетных дисках как результат конвектив- ной неустойчивости	178
Микрюков Д. В. Исследование устойчивости планетной систе- мы на космогонических временах	180
Молярова Т. С., Акимкин В. В., Вибе Д. З., Семе- нов Д. А. Соотношение C/O в газовой и ледяной фазе в протопланетных дисках	182
Назаров С. В., Харченко А. Проект восстановления телеско- па «Синтез» (АСТ-1200) в КрАО	184
Перминов А. С., Кузнецов Э. Д. Резонансная численно- аналитическая теория движения планет-гигантов Солнеч- ной системы	186
Постникова Е. С. Исследование рассеянных звездных скопле- ний Alessi 98 и Ruy 762	188
Потапов А. А., Нигматуллина Г. Р. Модель идеальной жид- кости в применении к описанию некоторых параметров тем- ной материи	190
Потоскуев А. Э., Кузнецов Э. Д. Динамическая эволюция пар астероидов на близких орбитах в окрестности резонансов	192
Пунанова А. Ф., Васюнин А. И. Цепочка образования мета- нола в холодных ядрах и видимое поглощение света: про- верка химической модели	194
Романовская А. М. Спектроскопия vs интерферометрия: срав- нение радиусов CP-звезд	196

Рябухина О. Л., Пирогов Л. Е. Исследование волокнообразного темного облака в области S242	198
Рябухина О. Л., Кирсанова М. С. Температура газа в молекулярном волокне WB 673	200
Салий С. В., Соболев А. М. Исследование состояний возбуждения серии переходов метанола $J_1 - J_0 A^{-+}$ в межзвездной среде	202
Самбаров Г. Е., Галушина Т. Ю., Сюсина О. М. Влияние близкого прохождения с Солнцем на астероид (196256) 2003 EH1 после 1000 года	204
Сафронова В. С., Кузнецов Э. Д. Исследование динамической эволюции пары астероидов (21436) Chaoyichi — (334916) 2003 YK39	206
Сизова М. Д., Постникова Е. С., Демидов А. П., Чупина Н. В., Верещагин С. В. Звездное скопление Гиады и новые кометы	208
Скрипниченко П. В., Кузнецов Э. Д. Динамическая эволюция астероидов, испытывающих совместное влияние эффекта Лидова–Козаи и эффекта Ярковского	210
Смирнова К. И., Вибе Д. З. Исследование областей звездообразования в галактиках NGC 1512, NGC 4618, NGC 4395 и NGC 660	212
Сюсина О. М., Галушина Т. Ю. Программно-математическое обеспечение для учета эффекта Ярковского и светового давления в задачах динамики астероидов	214
Топчиева А. П. Спектральные классы ионизирующих звезд и морфология инфракрасного излучения областей НII	216
Топчиева А. П. Определение физических параметров инфракрасного излучения в областях НII	218
Трофимов П. М. Унос астероидных пылинок под воздействием солнечного излучения	220
Шайдулин В. Ш. Модель движения астероида в Солнечной системе	222
Добролюбова В. А., Назаров С. В. Открытие переменных звезд в полях активных ядер галактик	224
Калинин А. А., Калинина Н. Д. О текущей временной асимметрии солнечных циклов	226
Калиничева Е. С., Саванов И. С., Дмитриенко Е. С. Дифференциальное вращение звезд спектрального класса А	228
Кожевников В. П. Фотометрические наблюдения промежуточного пояса HT Cam	230
Малышева Л. К. Углеводороды Титана и их значение для теории образования углеводородных ресурсов Земли	232
Назаров С. В. Явление микролинзирования Gaia16aye	234

Назаров С. В., Жовтан А. В., Лютый А. В., Козлов А. В. Гамма-телескоп ГТ-48: история, современность и перспективы	235
Назаров С. В., Бикүлова Д. А., Ховричев М. Ю., Рублевский А. Н. Обзор результатов астрометрических наблюдений спутников Урана и Нептуна на телескопах ГАО РАН и КраО РАН	237
Никифорова Т. П., Шагабутдинов А. И., Парфёнов С. Ю., Кожевникова А. В. Спектральные наблюдения послевспышечных петель в активной области NOAA 11515	238
Попова М. Э., Локтин А. В. О градиенте металличности в Галактике	240
Рычков Д. В., Башарин А. Д., Левитская Т. И. Создание постоянно действующей референцной станции ГНСС в городе Алапаевске	242
Список участников конференции	244

Contents

Lectures	5
Galushina T. Yu. Mean motion and secular resonances in the motion of near-Earth asteroids	6
Zinchenko I. I. High mass star formation	19
Silchenko O. K. Star formation in galaxies: a cosmological context	25
Ugolnikov O. S. Middle and Upper Atmosphere: Problems, Trends, Particles	40
Kholshchevnikov K. V. Family of metrics in the space of Keplerian orbits	61
Shustov B. M. On the universal basic distribution describing the initial mass function of various astronomical objects	72
Students talks	74
Balakina E. A., Pruzhinskaya M. V., Moskvitin A. S., Blinnikov S. I. Photometry and modeling of type IIb supernova 2017gpn	75
Vasilyev K. I., Yarovova A. D., Egorov O. V. Spectral diagnostics of star-forming regions in the galaxy DDO 53	77
Dmitrienko N. S., Boley P. A., Melnikov S. Y. Investigations of the young stellar object Th 28	79
Zhuklevich G. S. Application of methods of computational hydrodynamics for optimization of rocket nozzles	82
Zagoruyko I. S. Research of efficiency of numerical integration methods for on-board model of motion to GLONASS system .	83
Kozlova D. V., Moiseev A. V. Study of the new extended ionization cones in galaxies	85
Kolymagina E. A. The influence of coronal mass ejections on magnetospheres of hot jupiters	87
Kramarenko I. G. Where does gamma-ray emission in active galactic nuclei come from?	89
Kuzin A. V., Lisitsin D. D. The grain dynamics in a region of an ionized hydrogen	91
Markozov I. D. Study of statistical properties of Compton scattering in a magnetized relativistic plasma	93
Nikiforova V. V., Kulesh M. V., Seleznev A. F. Structure and kinematics of the wide vicinity of the Alpha Persei open cluster	95
Novinskaya A. K., Pruzhinskaya M. V., Rosnet P., Pauna N. The influence of host galaxy morphology on the properties of type IA supernovae	97
Panteleeva Ya. I. Lidov—Kozai effect and configuration stability of almost circular motion in restricted three body problem . .	99

Petrashkevich I. V., Punanova A. F. Deuterium fractionation in pre-stellar cores in the ρ Ophiuchi star forming region . . .	101
Popandopulo N. A. The modified technique for the identification and study of secular resonances in the dynamics of near-planetary objects	103
Popandopulo N. A., Aleksandrova A. G., Bordovitsyna T. V., Tomilova I. V. Numerical models of motion of artificial satellites of the Earth and the Moon. Latest version . .	105
Prokop'eva E. I. Sedimentation of dust particles and small bodies in the protosolar nebula	107
Sypkova A. M. Search and study of planetary nebulae candidates in the dwarf galaxy NGC 3077	109
Tikhonenko I. S. Orbital composition of inner bars in disk galaxies	111
Turygin S. S. Evaluation of solar mass loss rate due to the solar wind	113
Frolova V. A., Nokhrina E. E. Intensity distribution of synchrotron radiation from an inhomogeneous cylindrical jet: the limb brightening effect	115
Shevelev A. P., Salii S. V. Optimization of a method of searching the best approximation for an observed molecular spectra . .	117
Yarovova A. D., Egorov O. V. Emission spectrum modeling of a Wolf-Rayet star nebula in NGC 4068	119
Bystrov D. S., Akhmetova O. V. Meta-subject approach to study of astronomy	121
Gerasimov I. S., Egorov O. V. Study of star-forming regions in the galaxy Sextans A	123
Nigmatullina G. R., Garipova G. V., Potapov A. A. Stability of circular orbits of photons in galactic halo	125
Uskova A. V. Dependence of the methanol synthesis efficiency on the parameters of the chemical model	127
Khabibov R. E., Akhmetova O. V. Problems of studying astronomy at school	129
Vatolin. Y. Yu., Gorda S. Yu. Reduction of the photometric system of the telescope AstroSib-500RC	131
Volkov K. V., Smirnova K. I., Parfenov S. Yu. Photometric study of galaxies with water and without detected water masers in different spectral ranges	133
Gusev V. D., Kuznetsov E. D. Study of dynamical evolution of pairs of trans-Neptunian objects	135
Dedov E. O. Age determination of open clusters with GAIA DR2 .	137
Malyutin I. A., Kuznetsov E. D. Dynamic and thermal evolution of near-earth asteroids in orbits with high eccentricities	139

Naidenova A. S. Research of dependence of appearance of abnormally bright mesospheric clouds structures on large-scale space phenomena	141
---	-----

Contributed talks 143

Baluev R. V., Sokov E. N., Sokova I. A., Shaidulin V. Sh., and EXPANSION team WASP-12 b and WASP-4 b: planets falling onto the host star?	144
Baluev R. V., Mikryukov D. V. Fast MOID computation algorithm with error control	146
Baluev R. V., Rodionov E. I., Shaidulin V. Sh., Veselova A. V. Wavelet analysis of 2D distributions in the Main Belt and Milky Way populations	147
Balyaev I. A. Acceleration of numerical integration of asteroid motion equations and first results	149
Bisyarina A. P., Sobolev A. M., Stecklum B. IR-variability of the jet region in the vicinity of IRAS 20126+4104	151
Blinkova E. V., Tomilova I. V. Orbital evolution of objects moving in the neighbourhood of the resonance 1 : 4 with rotation of the Earth	153
Vakhitov R. F., Dudorov A. E., Khaibrakhmanov S. A. MHD model of the accretions disks around young stars	155
Gorda S. Yu., Polushina T. S. Massive eclipsed variable UU CAS — in the light of new data	157
Dryomova G. N., Dryomov V. V., Tutukov A. V. Interstellar planets and comets: origin mechanisms, discovery ways, and statistics	159
Efremova E. V. Processing of the observations of comet 21P Giacobini-Zinner obtained at the Zvenigorod Observatory of the INASAN	161
Zolotarev R. V., Jmailov B. B., Korchagin V. I. Numerical simulation of collisionless disk of NGC 1566 using graphics processing units	163
Kalinicheva E. S., Shematovich V. I., Paslyuchenkov Ya. N. Atmospheric escape of close-in Neptunes	165
Kargaltseva N. S., Dudorov A. E., Khaibrakhmanov S. A. Numerical simulation of primary protostellar disk formation	167
Kirsanova M. S., Punanova A. F. Molecular line emission towards HII region S235	169
Kononov D. A., Gorda S. Yu., Parfenov S. Yu. On the flow structure in the massive interacting binary system UU Cas	170
Kruglikov N. A., Krushinsky V. V., Grokhovsky V. I., Lyamova G. V., Popov A. A., Nazarov S. V. Hyperspectral imaging of protoplanetary matter	172

Kryukova E. A., Nazarov S. V. The search for a third body in binary star systems by the timing method using FL Lyr as an example	174
Letner O. N., Galushina T. Yu. The estimate of the Yarkovsky effect influence on the dynamics of the asteroids with small perihelion distances	176
Maksimova L. A., Pavlyuchenkov Ya. N. Episodic accretion in protoplanetary discs as a result of convective instability	178
Mikryukov D. V. Study of stability of a planetary system on a cosmogonic time scale	180
Molyarova T. S., Akimkin V. V., Wiebe D. S., Semenov D. A. C/O ratio in gas and ice components of protoplanetary disks	182
Nazarov S. V., Khartchenko A. The project for the restoration of the Synthesis telescope (AST-1200) in CrAO	184
Perminov A. S., Kuznetsov E. D. The resonant semi-analytical motion theory for giant planets of the Solar system	186
Postnikova E. S. Investigation of open star clusters Alessi 98 and Ryu 762	188
Potapov A. A., Nigmatullina G. R. The ideal fluid model as applied to the description of some parameters of dark matter	190
Potoskuev A. E., Kuznetsov E. D. Dynamical evolution of asteroid pairs in close orbits near resonances	192
Punanova A. F., Vasyunin A. I. Cold methanol formation ladder and visual extinction: test the chemical model	194
Romanovskaya A. M. Spectroscopy vs interferometry: comparison of the CP-stars radii	196
Ryabukhina O. L., Pirogov L. E. Study of the filamentary dark cloud in the S242 region	198
Ryabukhina O. L., Kirsanova M. S. Gas temperature in molecular filament WB 673	200
Salii S. V., Sobolev A. M. Study of excitation states of methanol transition series $J_1 - J_0 A^{-+}$ in the interstellar medium	202
Sambarov G. E., Galushina T. Yu., Syusina O. M. Influence of close approach with the Sun on the asteroid (196256) 2003 EH1 after 1000 year	204
Safronova V. S., Kuznetsov E. D. Dynamical evolution of asteroid pair (21436) Chaoyichi - (334916) 2003 YK39	206
Sizova M. D., Postnikova E. S., Demidov A. P., Chupina N. V., Vereshchagin S. V. Hyades star cluster and a new comets	208
Skripnichenko P. V., Kuznetsov E. D. Dynamic evolution of asteroids experiencing the combined influence of the Lidov-Kozai effect and the Yarkovsky effect	210

Smirnova K. I., Wiebe D. S. Study of star-forming regions in galaxies NGC 1512, NGC 4618, NGC 4395 and NGC 660 . . .	212
Syusina O. M., Galushina T. Yu. Software for taking into account the Yarkovsky effect and light pressure in the task of dynamics of asteroids	214
Topchieva A. P. Spectral Types of Ionizing Stars and the Infrared Morphology of HII Regions	216
Topchieva A. P. Determination of physical parameters of infrared radiation in HII regions	218
Trofimov P. M. The escape of asteroid dust particles due to solar radiation	220
Shaidulin V. Sh. Model of asteroid motion in the Solar system . .	222
Dobrolyubova V. A., Nazarov S. V. Discovery of variable stars in the fields of active galactic nuclei	224
Kalinin A. A., Kalinina N. D. About current temporal solar activity cycle asymmetry	226
Kalinicheva E. S., Savanov I. S., Dmitrienko E. S. Differential rotation of A-type stars	228
Kozhevnikov V. P. Photometric observations of the intermediate polar HT Cam	230
Malysheva L. K. Hydrocarbons of Titan and their significance for the theory of the Earth hydrocarbon resources formation . . .	232
Nazarov S. V. Microlensing event Gaia16aye	234
Nazarov S. V., Zhovtan A. V., Lyuty A. V., Kozlov A. V. GT-48 gamma telescope: history, modernity and prospects . .	235
Nazarov S. V., Bikulova D. A., Khovritchev M. Yu., Rublevsky A. N. Review of the results of astrometric observations of the uranian and neptunian satellites with the Pulkovo and Crimean observatories telescopes	237
Nikiforova T. P., Shagabutdinov A. I., Parfenov S. Yu., Kozhevnikova A. V. Spectral observations of after-flare loops in the active area NOAA 11515	238
Popova M. E., Loktin A. V. On the metallicity gradient in the Galaxy	240
Rychkov D. V., Basharin A. D., Levitskaya T. I. Creation of a permanently operating GNSS reference station in the city of Alapaevsk	242

List of participants	244
-----------------------------	------------

Научное издание

Физика Космоса

Труды 49-й Международной
студенческой научной конференции
Екатеринбург, Россия
27—31 января 2020 г.

Ответственная за выпуск Д. Д. Залесова
Редактор Т. А. Федорова
Оригинал-макет — Д. З. Вибе, Э. Д. Кузнецов, А. Б. Островский,
С. В. Салий

Подписано в печать 20.01.2020. Формат 60 × 84 1/16.
Уч.-изд. л. 17,6. Усл. печ. л. 15,5.
Гарнитура Times.

Издательство Уральского университета
620000, Екатеринбург-83, ул. Тургенева, 4.
Тел. +7(343) 358-93-06, 350-58-20
Факс: +7(343) 358-93-06
E-mail: press-urfu@mail.ru
<http://print.urfu.ru>

Данное электронное сетевое издание размещено
в электронном архиве УрФУ: elar.urfu.ru

ISBN 978-5-7996-2935-9



